



TITLE:

コンクリート内部鉄筋破断の漏洩  
磁束法片面診断に関する研究(  
Dissertation\_全文)

AUTHOR(S):

寺澤, 広基

---

CITATION:

寺澤, 広基. コンクリート内部鉄筋破断の漏洩磁束法片面診断に関する研究. 京都大学, 2014, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2014-09-24

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18567>

RIGHT:

コンクリート内部鉄筋破断の漏洩磁束法  
片面診断に関する研究

2014 年

寺 澤 広 基



## 目次

第1章 序論.....	- 1 -
1.1 研究背景.....	- 1 -
1.2 既往の研究.....	- 3 -
1.2.1 ASR によるコンクリート構造物の劣化.....	- 3 -
1.2.2 ASR による鉄筋曲げ加工部での破断.....	- 3 -
1.2.3 鉄筋破断の非破壊試験.....	- 5 -
1.3 研究目的.....	- 9 -
1.4 論文の構成.....	- 9 -
第2章 破断診断のメカニズムの検討.....	- 13 -
2.1 破断の有無による帯磁状況の違い.....	- 13 -
2.1.1 解析概要.....	- 13 -
2.1.2 鉄筋隅角部周辺の磁束密度分布.....	- 17 -
2.2 計測手法の検討.....	- 28 -
2.2.1 実験概要.....	- 28 -
2.2.2 着磁範囲の影響.....	- 31 -
2.2.3 着磁および測定範囲の検討.....	- 34 -
第3章 診断対象の影響要因およびばらつきの検討.....	- 36 -
3.1 実験概要.....	- 36 -
3.1.1 パラメータ.....	- 36 -
3.1.2 供試体概要.....	- 36 -
3.1.3 計測方法.....	- 37 -
3.1.4 診断指標.....	- 37 -
3.2 測定鉄筋に関する影響要因.....	- 38 -
3.2.1 鉄筋状態.....	- 38 -
3.2.2 かぶり.....	- 40 -
3.2.3 鉄筋径.....	- 43 -
3.3 ばらつきを考慮した判断基準の作成.....	- 45 -
3.3.1 診断指標のヒストグラム.....	- 45 -
3.3.2 ばらつきの分布の検定.....	- 47 -
3.3.3 破断の有無の判断基準の設定方法.....	- 49 -
第4章 現場を想定した診断可能性の検討.....	- 54 -
4.1 配筋ピッチの影響.....	- 54 -
4.1.1 実験概要.....	- 54 -

4.1.2	実験結果 .....	- 55 -
4.1.3	判断基準の統合 .....	- 60 -
4.2	実在する橋梁での診断 .....	- 62 -
4.2.1	フィールド試験概要 .....	- 62 -
4.2.2	フィールド試験結果 .....	- 64 -
第 5 章	鉄筋状態のスクリーニングに関する検討 .....	- 68 -
5.1	簡易な着磁方法による帯磁状況の違い .....	- 68 -
5.1.1	解析概要 .....	- 68 -
5.1.2	鉄筋隅角部の磁束密度分布 .....	- 70 -
5.2	簡易な着磁方法による診断の影響要因 .....	- 78 -
5.2.1	実験概要 .....	- 78 -
5.2.2	測定鉄筋に関する影響要因 .....	- 79 -
5.2.3	ばらつきを考慮した判断基準の作成 .....	- 87 -
5.2.4	連続した着磁の影響 .....	- 96 -
第 6 章	漏洩磁束法による鉄筋破断診断フローの提案 .....	- 98 -
6.1	本論文で提案した手法の総括 .....	- 98 -
6.2	ASR 劣化構造物の維持管理に関する提言 .....	- 100 -
6.2.1	現行の維持管理フロー .....	- 100 -
6.2.2	鉄筋探査 .....	- 104 -
6.2.3	漏洩磁束法による鉄筋健全度調査のフロー .....	- 105 -
第 7 章	結論 .....	- 109 -
7.1	本研究により得られた結論 .....	- 109 -
7.2	今後の課題および展望 .....	- 111 -

謝辞

付録 1：簡易な着磁の着磁位置の検討

付録 2：漏洩磁束法片面診断によるかぶりの推定

# 第1章 序論

## 1.1 研究背景

平成25年は「社会資本メンテナンス元年」とも言われており、老朽化した構造物の維持管理・更新への意識が以前にも増して高まっている<sup>1)</sup>。図1-1に示す15m以上の道路橋の年代ごとの建設数および累計より、わが国で2011年までに建設された約16万橋の内、およそ30%にあたる約4万7千橋は1955年から1973年までの高度経済成長期に建設されたものであり、2014年現在、供用開始から40～60年が経過している<sup>2)</sup>。供用開始から40年以上経過した橋梁の内、上部工の約50%、下部工の大多数はコンクリート構造であることから、今後、高齢化した数多くの道路橋を供用していく上でコンクリート構造物の維持管理が重要であることを確認できる。

構造物の維持管理の考え方としては、劣化が顕在化した段階で補修・補強対策を実施する「事後保全」と、劣化をできるだけ早期に発見し、適切な対策を採ることで長寿命化を図る「予防保全」がある。補修・補強を行う財源確保の観点から後者による維持管理の重要性が広く認識されており、各機関で検討・実施されつつある<sup>3),4)</sup>。コンクリート構造物の劣化の種類に着目すると、劣化の速度が速く、発生地域が限定的であり、劣化後の補修効果が薄く費用がかかるという特徴を持つ塩害は予防保全による維持管理が効果的であり、予防保全を前提とした対応が指示されている<sup>5)</sup>。一方、アルカリシリカ反応（Alkali-Silica Reaction, 以下、ASR）など劣化の速度が比較的緩やかな劣化に対しては目視点検を基本とした対処療法的な対応が合理的と言われている<sup>6)</sup>。

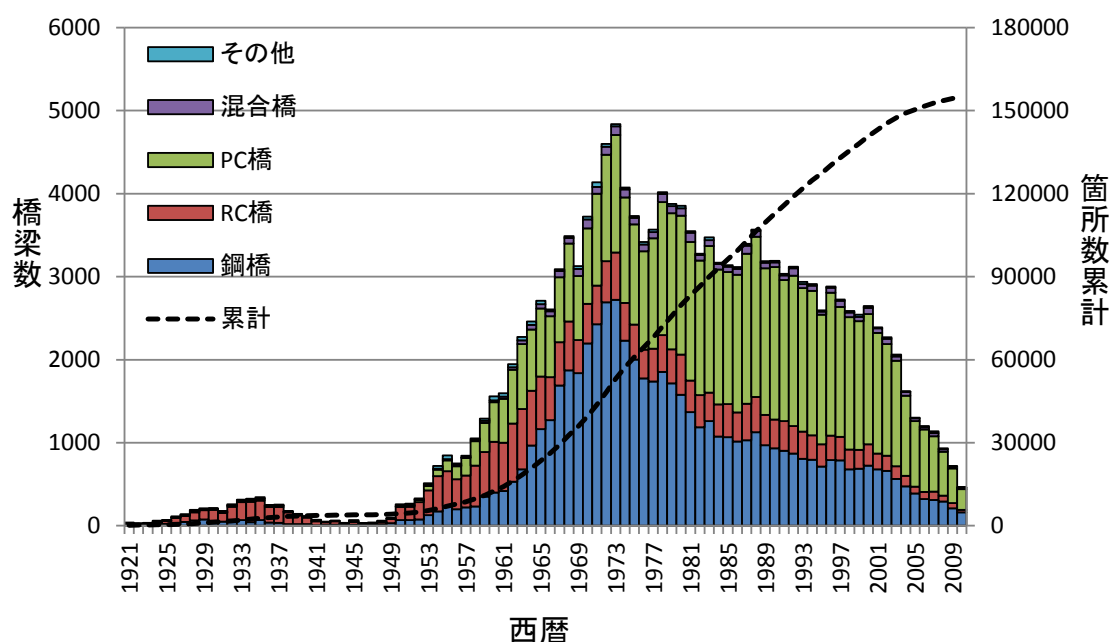


図1-1 年代ごとの橋梁建設数と累計<sup>2)</sup>

ASR により劣化した構造物に目に見えて表れる変状として放射状，あるいは鉄筋方向に沿ったひび割れやゲルの滲出などがある．これは材料の骨材中のシリカと細孔溶液中のアルカリが反応し生成したアルカリシリカゲルの吸水・膨張によるものであり，コンクリートの強度低下をもたらす．また，一旦ひび割れが発生すると，外部から水が浸入しやすくなることによる ASR の助長，凍結融解作用および浸蝕性媒体の影響による鋼材腐食などコンクリート構造物の耐久性に影響を与える<sup>7)</sup>．この問題に関して，わが国では昭和 59 年 6 月に ASR でひび割れを生じた構造物に対する遮水措置，昭和 61 年に骨材の選定，低アルカリ型セメント，抑制効果のある混合セメント等の使用，コンクリート中のアルカリ総量の抑制などの対策が採られてきた<sup>8)</sup>．

ところが近年，ASR 抑制対策が行われる前に造られた ASR 劣化構造物の一部で内部の鉄筋が隅角部において破断するというショッキングな事例が報告されている（写真 1-1）．ASR を生じたコンクリート構造物でも鉄筋が健全であり，かつ引張主鉄筋の定着が健全であれば部材の曲げ耐力やせん断耐力の著しい低下は見られないと考えられていたが，鉄筋の破断が発生した場合，コンクリートの拘束効果が無くなることから大きな内部損傷が発生し得ることが指摘されている<sup>9)</sup>．この事態に対し，国土交通省道路局の「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案）」では，連続した幅 2～5mm 程度のひび割れが生じている場合などに対し，その箇所全数または代表的な箇所を部分的にはつりだし，その状態を目視により確認するものとしている<sup>10)</sup>．しかし，コンクリートのはつり調査は多大な労力が必要であり，また構造的な影響を考慮するとあまり多用することは好ましくない．

このような理由から，コンクリートを破壊することなく，内部の破断した鉄筋を効率的に抽出する非破壊検査手法の確立が求められている．



写真 1-1 コンクリート内部の鉄筋破断

## 1.2 既往の研究

### 1.2.1 ASR によるコンクリート構造物の劣化

#### (1) ASR のメカニズム

ある種の鉱物とコンクリート内の細孔溶液中のアルカリの化学反応を起こし、コンクリートに異常な膨張およびそれに伴うひび割れを発生する現象をアルカリ骨材反応（AAR）と呼ぶ。AAR は反応機構により ASR、アルカリ炭酸塩反応およびアルカリシリケート反応の 3 種類に分類されると考えられてきたが、最近の研究ではいずれも ASR であるという説が有力である<sup>11)</sup>。ASR は、まず骨材中の反応性の高い結晶構造を持つシリカ（ $\text{SiO}_2$ ）と、セメントに含有される硫酸アルカリや海砂、海砂利から供給される塩化ナトリウム由来の高濃度の水酸化アルカリを主成分とする水溶液が接触することで、水酸化イオンにより Si-O-Si 結合が破断され量子表面より化学反応が進行し、その結果アルカリシリカゲルが生成される。このアルカリシリカゲルが周囲の水を吸収することにより膨張圧力が生じ、コンクリート表面にひび割れが表れる<sup>7)</sup>。

#### (2) ASR の影響要因

国土交通省によるレディーミクストコンクリートに使用された骨材の調査によると、わが国における骨材のアルカリ反応性の判定方法である化学法（JIS A 1145）、モルタルバー法（JIS A 1146）により細骨材の約 9%、粗骨材の約 15%が「無害でない」と判定されており、またその骨材は全国に広く分布していることが明らかとなっている<sup>12)</sup>。アルカリ量、反応性骨材の他に ASR による膨張に影響を及ぼす要因としては温度や湿度がある。温度が高く、コンクリート内部の相対湿度が 80～85%以上の条件では ASR による膨張が継続するため、同一構造物でも直射日光の当たる所や雨水の当たる所において ASR が表面化することが多い<sup>13)</sup>。

### 1.2.2 ASR による鉄筋曲げ加工部での破断

#### (1) 鉄筋破断のメカニズム

コンクリート構造物内部で破断した鉄筋は、節の付け根の曲率半径が現行市販品と比較して小さい電炉鉄筋であること、曲げ内半径は規格値である 2d より小さいものが多いこと、破断や亀裂は節の曲げ内側から発生しており脆性破壊の様相を呈しているなどの特徴が見られることから、以下に示すシナリオにより ASR の鉄筋破断に至ると推定されている<sup>14)</sup>。

1. 規定の曲げ半径より小さい値で内側の節がつぶれるように曲げ加工が行われることにより節の付根に亀裂が生じ、加工硬化による破壊靱性の低下およびスプリングバックによる引張残留応力の発生が起こる。
2. ひずみ事項による脆化が進行し、亀裂進展に対する抵抗がさらに低下する。
3. ASR によるコンクリートのひび割れが発生・進展し、水分が浸入することにより鉄筋の腐食が促進され、同時に水素吸蔵量の増加により水素脆化割れの可能性が生じる。
4. ASR による膨張力に伴う曲げ戻しの力の発生と曲げ内側の引張残留応力により、降伏応力以上の引張応力が発生することで亀裂が進展し脆性破壊に至る。



## (2) 鉄筋破断の報告事例

ASR による鉄筋破断は主に北陸地方、関西地方などの地域で報告されている。鉄筋破断の箇所を図 1-2 に示す。鉄筋破断の報告が多いのは RC 橋脚や PC 橋脚・梁部でのせん断補強筋（スターラップおよび折り曲げ鉄筋）の曲げ加工部であり、その他には梁の主鉄筋、柱部の帯鉄筋、地中または水中のフーチング橋軸方向上面の主鉄筋などの曲げ加工部における破断事例も見つかっている。これまでに提案されている維持管理フローでは、ASR 劣化構造物において、①連続した 2～5mm 以上の幅のひび割れ、②特定の箇所の 1～3mm 以上の幅ひび割れ、③コンクリート表面の 2～5mm 以上の段差、④過去にひび割れ注入工などの補修を行って充填したひび割れにおいて、幅 1mm 以上の再開口がある場合、鉄筋健全度調査を行うものとしている<sup>10)</sup>。ここで、②の特定の箇所とは T 型橋脚の上側・端など雨水や直射日光の影響を受けやすい箇所でもある。能登有料道路で実施した調査結果では 0.5mm 以下のひび割れでも鉄筋破断が発生している場合もあり<sup>15)</sup>、外観観察のみで鉄筋破断の推定を行うことが難しいケースも存在する。また、複数の鉄筋破断が生じた ASR 実構造物では、鉄筋破断および亀裂が連続的に生じる箇所と破断が単独で生じる箇所の 2 つの損傷パターンが確認されており<sup>16)</sup>、破断箇所を効率的に特定するには鉄筋破断に関する非破壊検査手法が必要である。

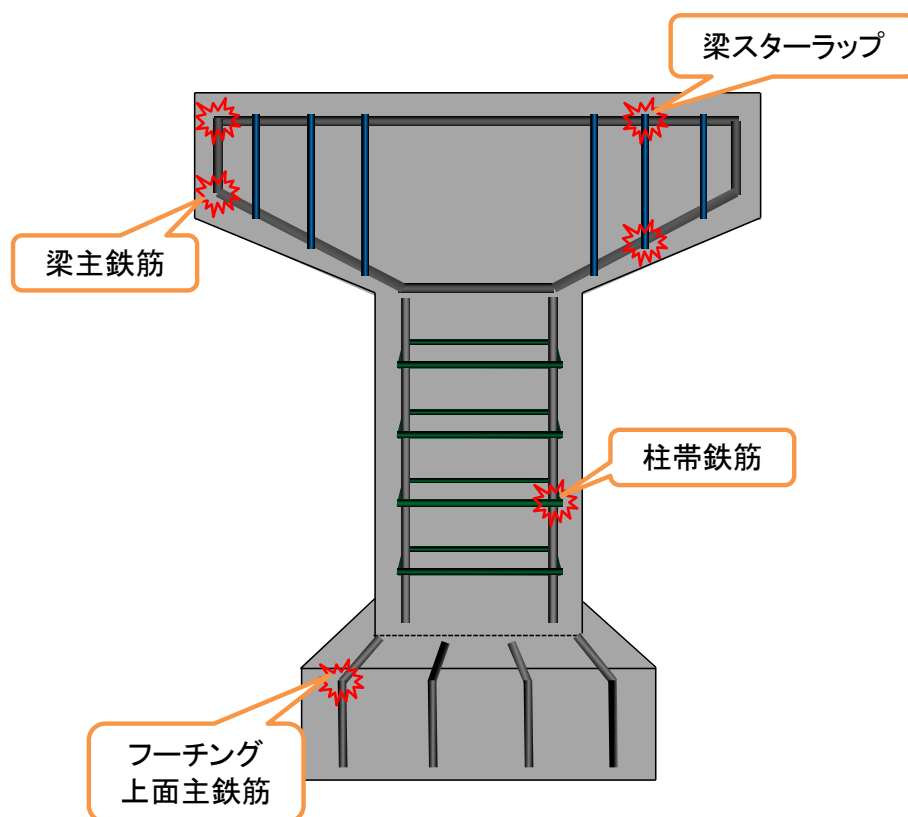


図 1-2 橋脚の鉄筋破断箇所<sup>15)</sup>

### 1.2.3 鉄筋破断の非破壊試験

非破壊試験とは検査の対象とする構造物を破壊しない試験方法であり、コンクリートの分野においては強度、単位セメント量、透気性、塩化物量、配筋、構造物の品質および耐久性などを評価することに用いられている<sup>17)</sup>。以下、コンクリート内部の鉄筋破断の検出が試みられている主な非破壊検査手法を紹介する。

#### (1) 超音波法<sup>18), 19)</sup>

超音波とは可聴域の  $20\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$  を超える高周波数の音であり、可聴音と比較すると、送信・受信時刻の特定がしやすく伝播時間の測定精度が高いこと、周波数が高くなるにつれて小さな不連続部分からの反射波が得やすくなること、指向性が大きく特定の方向に発信しやすいことなどが特徴として挙げられる。コンクリートを対象とした非破壊試験で用いられる超音波は、主に圧電効果を利用した探触子の機械的な振動により発生させた弾性波であり、伝播してきた弾性波系を電圧信号に変換する機能を持つ探触子によって受信される。この伝播時間や受信波形の周波数、振幅値の変化を用いることで、コンクリートの圧縮強度、男性係数、内部欠陥位置、ひび割れ深さの推定などに用いられている。

超音波は伝播経路上のひび割れに応じて散乱・減衰する性質があり、健全なコンクリートに適用した場合と比較して到達時間が遅れることから、図 1-3 に示すように隅角部から探触子までの距離を変化させることで、表層の劣化部を評価できる。このような特徴を利用し、コンクリート隅角部付近に発生したひび割れが断面内の深い位置まで達しているかどうかを検証することで間接的な鉄筋破断の可能性の評価を行う。橋脚梁端部において、後の調査で鉄筋破断が確認された箇所超音波斜角法を適用した場合、破断していない箇所よりも受信した伝播波形の振幅は小さく、初期の伝播波形の波長は長く、伝播速度も遅くなる傾向にあることが確認されている。

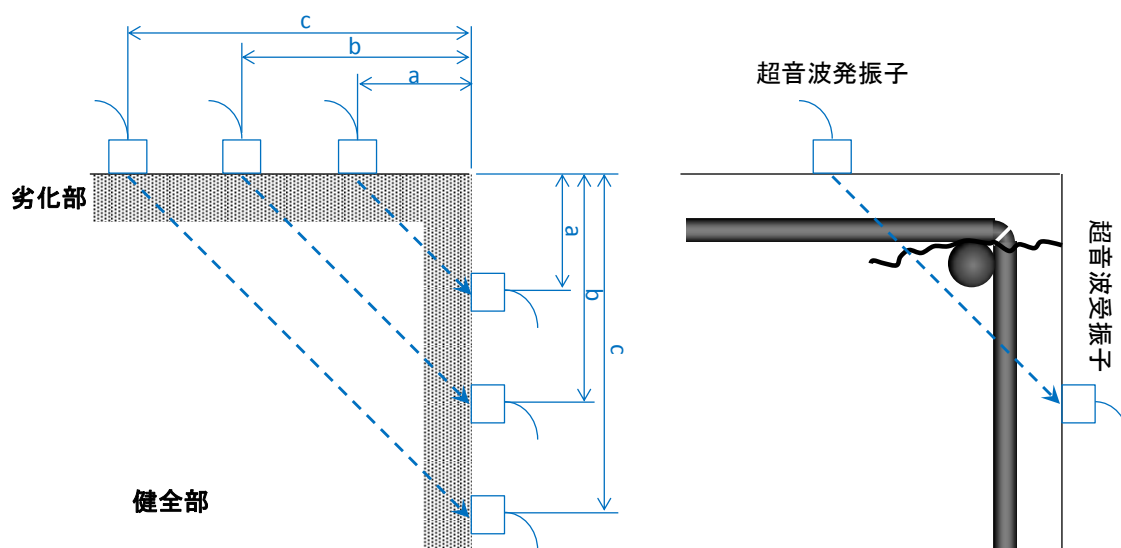


図 1-3 超音波斜角法による破断検出手法概要

## (2) 電磁誘導法<sup>18), 19)</sup>

電磁誘導を用いた非破壊試験では、試験コイルに交流電流を流して交流磁界を発生させ、その磁束の変化により試験体の形状や傷などの物理的な特徴の検出を行う。この手法は電磁波レーダ法と並びコンクリート中の鉄筋探査法として広く利用されている。電磁誘導現象によって鉄筋に発生する過電流は作用する交流磁束の周波数によって影響を受け、周波数を低くすると鉄筋の透磁率の変化が支配的となり、周波数を高くすると鉄筋に発生した過電流が主体となり磁束に変化を与える。これらの特性を利用し、かぶりと鉄筋径を同時に推定する機種も実用化されている。

電磁誘導法の原理を応用した隅角部での鉄筋破断の検出手順として、まず図 1-4 に示すようにセンサを測定対象の鉄筋直上で走査し、検出コイルの信号を得る。センサ内の励磁コイルの励磁電圧波形を $v$ ，検出コイルの位置 A, B での検出電圧波形をそれぞれ $v_A$ ， $v_B$  とすると、各電圧波形は式(1.1)，(1.2)，(1.3)で表される。

$$v = V \sin \theta \quad (1.1)$$

$$v_A = V_A \sin(\theta - \Psi_A) \quad (1.2)$$

$$v_B = V_B \sin(\theta - \Psi_B) \quad (1.3)$$

ここに、

$V$ ：電圧波形の振幅

$(\theta - \Psi)$ ：電圧波形の位相

ここで $V$ ， $\sin(\theta - \Psi)$ を XY 平面に表示し、任意の位置 A から位置 B に移動したときの軌跡（リサーチ波形）に着目すると、健全の場合は丸みを帯びた形状となるのに対し、破断では尖った形状となる。

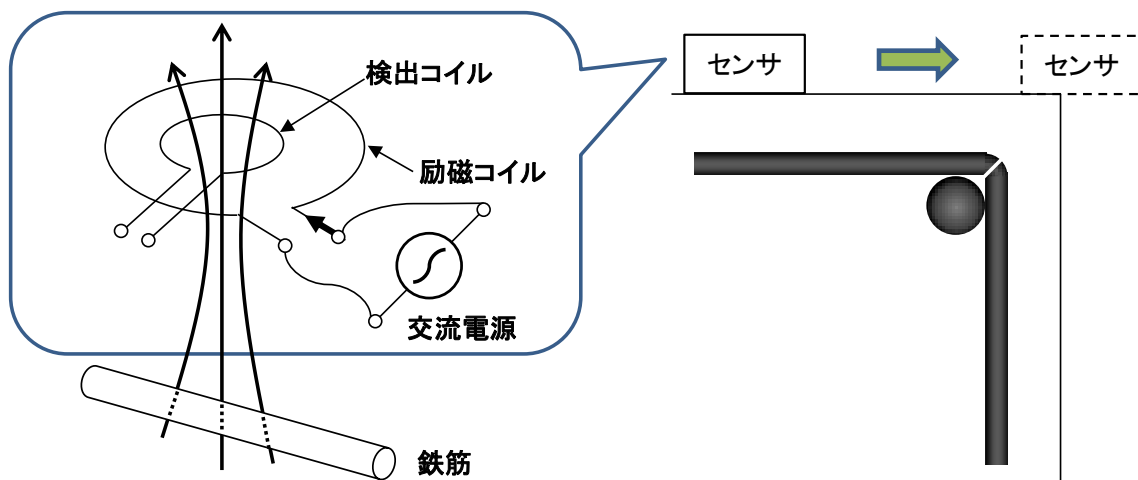


図 1-4 電磁誘導法による破断検出手法概要

### (3) 電磁パルス法

電磁パルス法は、電磁鋼板にマグネットワイヤを巻きつけた励磁コイルにパルス状の電流を流すことで発生する瞬間的な磁界によって対象の磁性体に振動を付与し、生じた弾性波の特性を分析する手法である。コンクリートを対象とした非破壊検査手法として、PC 構造物中のシーす内部のグラウト充填評価などに適用されている<sup>20)</sup>。

電磁パルス法を利用した鉄筋隅角部での破断検出の原理を図 1-5 に示す。励磁コイルを用いて発生させた鉄筋の振動による弾性波は隅角部を挟んで設置されたセンサで受信されるが、鉄筋中を伝播する弾性波の速度（5960m/s）はコンクリート中を伝播する弾性波の速度（4000m/s 程度）より速いため、弾性波の伝播経路は鉄筋曲げ加工部の破断の有無により異なり、伝播時間に差が生じる<sup>21)</sup>。この他にも、鉄筋とコンクリートの弾性波が伝播する場合の減衰の差に着目した波形振幅や周波数スペクトルといった指標による破断検出の可能性が示唆されている<sup>22)</sup>。

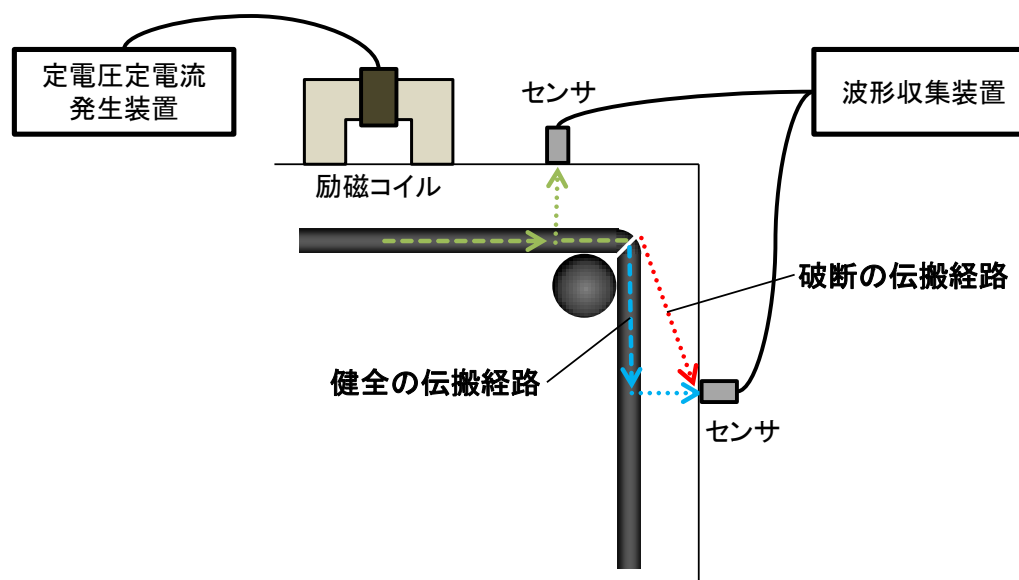


図 1-5 電磁パルス法による破断検出手法概要

#### (4) 漏洩磁束法（磁気法）

漏洩磁束法は鉄筋が強磁性体であり，コンクリートは骨材などに含まれる僅かな磁鉄鉱を除きほぼ非磁性体であることに着目した検査手法である．磁気とは，電子の軌道運動やスピン（辞典運動）がもつ角運動量がもたらす磁気モーメント，あるいは電流による磁界（磁場）と呼ばれるエネルギー場の源と考えられ，軟磁性体である鉄筋はこの磁界に反応し図 1-6 に示すように磁化される．消磁状態の強磁性体に作用させる磁界  $H$  が大きくなるほど磁化  $M$  は大きくなり，ある強さ以上の磁界に対して磁化は飽和して飽和磁化  $M_s$  に達する．この状態から磁界を減らすと磁界  $H=0$  でも残留磁化  $M_r$  が残る<sup>23)</sup>．

漏洩磁束法による鉄筋曲げ加工部の検査手順は図 1-7 に示すようにコンクリート隅角部を境に 2 面に分けて行う．まず，永久磁石を用いて隅角部の両面から強い磁束を与えることで測定鉄筋を磁化させ，その後，残留磁化のコンクリート表面まで及ぶ漏洩磁束を磁気計測ユニットで計測する．測定された磁束密度と曲げ加工部からの位置を用いて磁束密度分布をとると，健全の場合は鉄筋の無い範囲で 0 に近いほぼ一定値に収束し，曲げ加工部と逆側の着磁範囲の端部付近で極を持つ形状となる．隅角部で鉄筋が破断している場合，破断箇所において磁極が発生することから，健全の特性に加えて曲げ加工部の内側約 0.1m の位置でピークを持つ分布が得られる<sup>24)</sup>．このような特徴から，曲げ加工部での磁束密度を基準としたピークの値を指標とすることにより，かぶり 150mm 程度まで破断の有無の診断が可能であり，実構造物での適用結果からもこの手法の有効性が示されている<sup>25)</sup>．

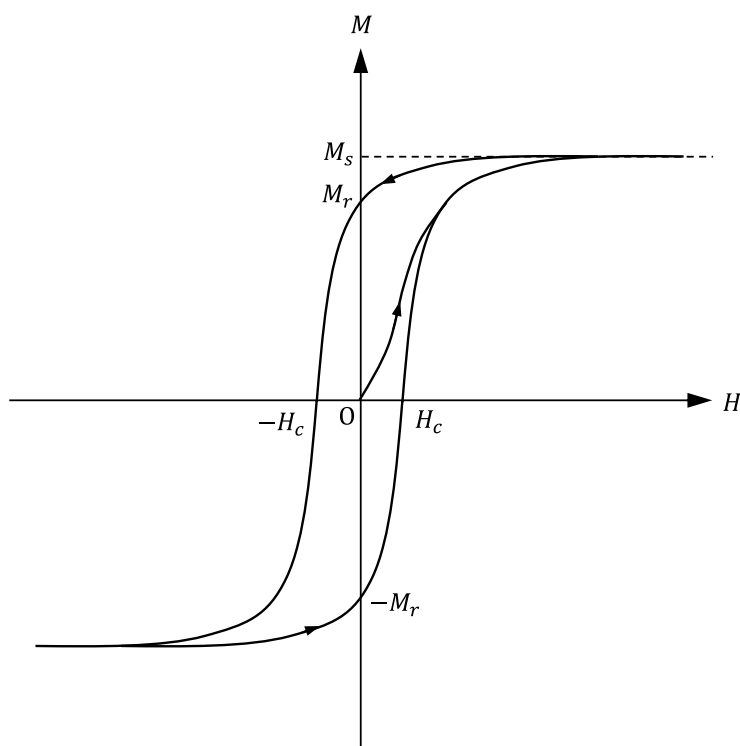


図 1-6 強磁性体のヒステリシス曲線

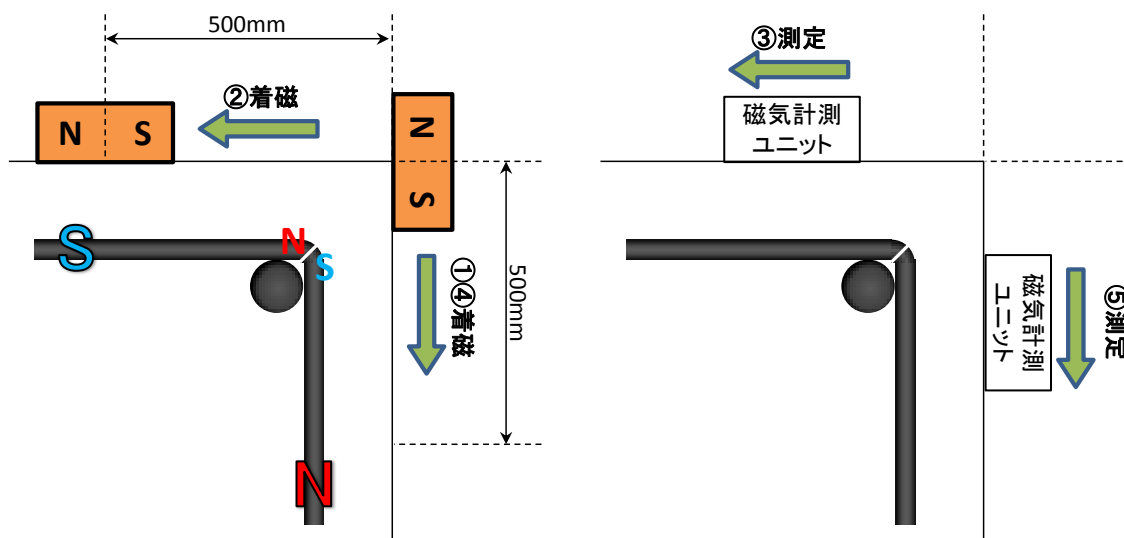


図 1-7 漏洩磁束法による破断検出手法概要

### 1.3 研究目的

コンクリート構造物内部の隅角部での鉄筋破断を対象とするいくつかの非破壊検査手法が開発・検討されており，その中でも漏洩磁束法は診断精度・適用かぶりの大きさなどから有力な手法と考えられているが，曲げ加工部での鉄筋破断の診断を行うには隅角部に対し上面・側面の2方向から着磁および測定が行えることが前提となる．しかし，ASRが進行し易く鉄筋破断に対する注意が必要な箇所の一つである橋脚の梁上部などでは，上部工の存在などの構造上の理由により隅角部の両面からのアクセスができない場合があり，これまでの診断手法が適用できない．このような背景から，本研究では漏洩磁束法の原理を利用し，隅角部の鉄筋破断に対する片面側からのみの診断手法を提案すること，提案手法を含めた隅角部鉄筋破断の非破壊検査の効率的な手順を構築することを目的とする．

### 1.4 論文の構成

漏洩磁束法による片面診断手法を提案するにあたり，①提案手法による破断診断のメカニズム，②診断に影響を与える要因の検討および適用可能な範囲を明確にする必要がある．本論文は全7章となっており，その構成を図1-8に示す．

第1章では，大量にストックされている高齢化したコンクリート構造物の維持管理に関して，ASRによる鉄筋破断というコンクリート構造の安全性を脅かす現象に対して，コンクリートをはつり出す多大な労力を必要としない非破壊検査手法が適用できないケースがあることを指摘し，その場合においても適用できる手法の開発という研究目的を示した．第2章では，漏洩磁束法片面診断による鉄筋破断診断のメカニズムについて検討する．具体的には有限要素法解析を用いて，片面からのみの着磁により，健全と破断で帯磁状態にどのような違いが生じるか，また実験結果から診断に適した着磁方法と診断に用いる指標

を示し、片面診断手法の可能性について検討した。第 3 章では、鉄筋状態、鉄筋径、かぶりなど測定鉄筋に関するパラメータを採った実験結果の結果から、漏洩磁束法片面診断に影響する要因や適用の条件を明らかにするとともに、測定結果のばらつきの評価方法および破断の有無の判断基準の設定方法に関する検討を行う。第 4 章では、実際の現場での適用を想定し、配筋ピッチによる影響を検討するとともに、ピッチごとの判断基準を示す。また、本手法を用いて実在する橋梁で行った鉄筋破断診断結果から判断基準の適用性について検討する。第 5 章では、診断の簡易化および精度の向上を目的に、第 2 章で示した着磁方法よりも簡易な着磁方法を用いた鉄筋状態のスクリーニング手法を提案し、提案する片面診断手法との比較を行いその適用性について検討する。第 6 章では、本論文で提案する 2 つの診断手法を含めた、漏洩磁束法を用いる鉄筋破断の片面診断の効率的な手順およびコンクリート構造物の維持管理フローに関する提案を行う。第 7 章では、本論文により得られた知見を取りまとめ、今後の課題および展望を示す。

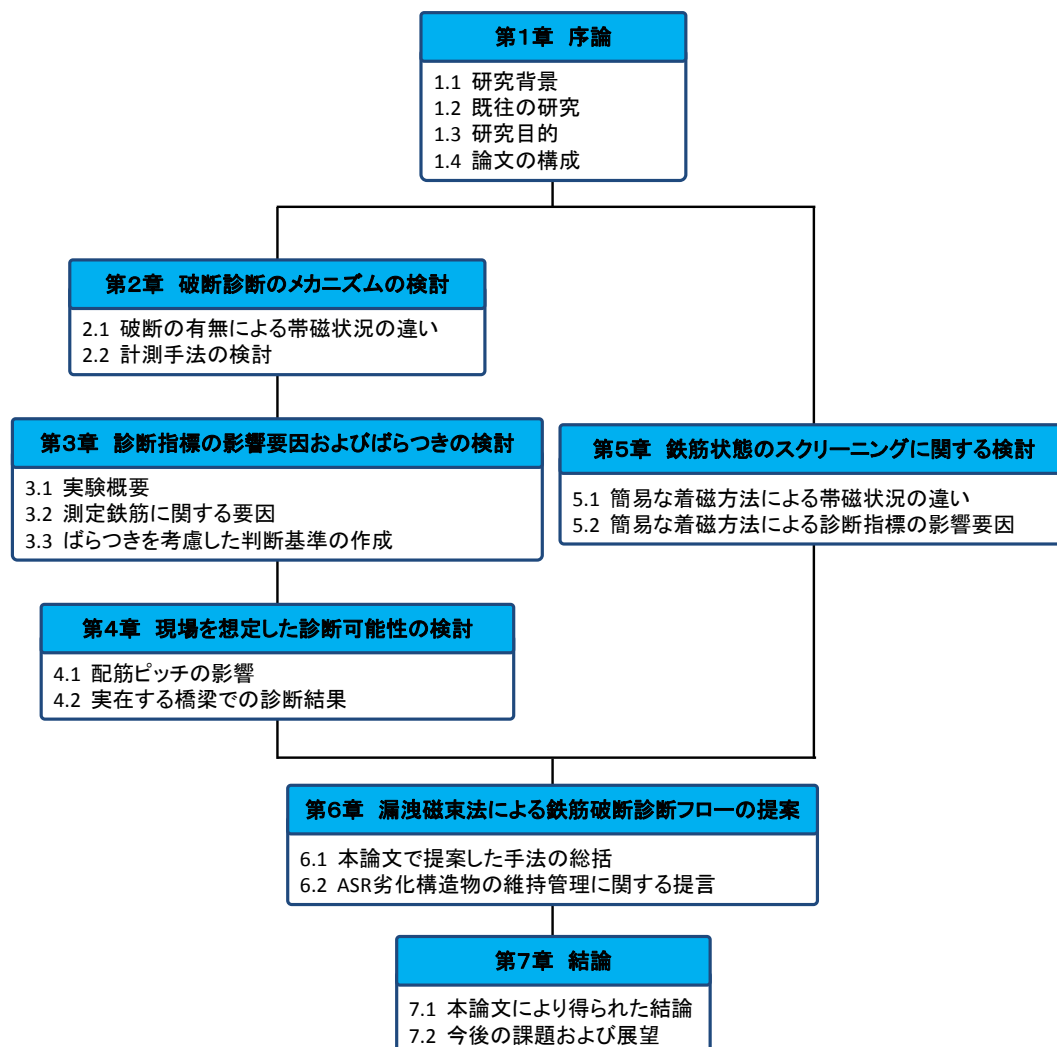


図 1-8 本論文の構成



## 【参考文献】

- 1) 国土交通省：インフラ長寿命化計画（行動計画），2014.5  
<http://www.mlit.go.jp/common/001040309.pdf>
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：資料第 776 号「平成 24 年度道路構造物に関する基本データ集」，2014.1  
<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/siryou/tnn/tnn0776pdf/ks0776.pdf>
- 3) 宮川豊章：資源の有効利用とコンクリート，コンクリート工学誌，Vol. 35，No. 2，pp.57-62，1997.2
- 4) 森濱和正：土木構造物の検査，コンクリート工学誌，Vol. 48，No. 5，pp.43-47，2010.5
- 5) 国土交通省道路局：コンクリート橋の塩害に関する特定点検要領（案），2004.3  
[http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/engai\\_youryou.pdf](http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/engai_youryou.pdf)
- 6) 河野広隆：コンクリート構造物のアルカリ骨材反応劣化進行と維持管理のあり方に関する研究，京都大学博士論文，2004.12
- 7) 例えば，岡田清：最新コンクリート工学，国民科学社，pp.62-72，pp.239-241，1986.3
- 8) （社）土木学会：アルカリ骨材反応対策小委員会報告書－鉄筋破断と新たな対応－，2005.9
- 9) 鳥居和之，池富修，久保善司，川村満紀：ASR 膨張によるコンクリート構造物の鉄筋破断の検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 23，No. 2，pp.595-600，2001.
- 10) 国土交通省道路局：道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案），2003.3  
[http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/arukari\\_youryou.pdf](http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/arukari_youryou.pdf)
- 11) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術 '12[基礎編]，p.46，2012.2
- 12) 古賀裕久，河野広隆：骨材のアルカリ骨材反応性に関する全国調査結果，土木学会第 59 回年次学術講演会概要集，第 5 部門，5-001，2004.9
- 13) 日本コンクリート工学協会：コンクリート便覧[第 2 版]，pp.295-296，p.846，1986.2
- 14) 佐々木一則：アルカリ骨材反応を生じた鉄筋コンクリート構造物の鉄筋破断原因究明と維持管理方法に関する研究，京都大学博士論文，2011.9
- 15) 鳥居和之，宮村雅之，湊俊彦，西川元気：能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策，コンクリート工学誌，Vol. 46，No. 4，pp.27-33，2008.4
- 16) 上原伸郎，幸左賢二，大代武志，山口和成：複数の鉄筋破断が生じた ASR 実構造物の鉄筋損傷評価，構造工学論文集，Vol. 59A，pp.866-877，2013.3
- 17) 日本非破壊検査協会：新コンクリートの非破壊試験，技報堂出版，2010.3
- 18) 野村倫一，葛目和宏，藤原規雄：ASR による鉄筋破断に関する非破壊調査，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp.2013-2018，2004.



- 19) 新道路技術会議：ASR 劣化構造物安全性能評価手法の開発，道路政策の質の向上に資する技術研究開発成果報告レポート，No. 17-7，2008.7  
<http://www.mlit.go.jp/road/tech/jigo/h17/pdf/report17-7.pdf>
- 20) 鎌田敏郎，内田慎哉，角田瑠，佐藤浩二：実橋梁 PC 桁での非破壊試験による PC グラウト充填評価方法に関する研究，土木学会論文集 E2，Vol. 68，No. 4，pp.238-250，2012.10
- 21) 李興洙，鎌田敏郎，内田慎哉，新名勉，久利良夫：電磁パルス法によるフープ筋曲げ加工部の鉄筋破断の検出方法に関する基礎研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 11 巻，pp.291-298，2011.10
- 22) 平野正大，内田慎哉，鎌田敏郎，李興洙，飛ヶ谷明人：電磁パルス法によるコンクリート中の鉄筋破断の評価指標に関する研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，第 13 巻，pp.203-208，2013.11
- 23) 小沼稔：磁性材料，工学図書株式会社，pp.23-28，1996.4
- 24) 松田耕作，廣瀬誠，前田龍己，横田優：新しい鉄筋破断非破壊診断手法の開発，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，第 6 巻，pp.425-430，2006.10
- 25) 廣瀬誠，前田龍己，松田耕作，横田優，服部篤史，宮川豊章：磁気法による鉄筋破断非破壊検査における判定基準の構築，構造工学論文集，Vol. 58A，pp.867-878，2012.3

## 第 2 章 破断診断のメカニズムの検討

### 2.1 破断の有無による帯磁状況の違い

漏洩磁束法を用いた鉄筋破断の片面診断手法の確立を目指すに当たり，まず，測定鉄筋が隅角部で破断しているか否かによって，片面からの着磁のみでも鉄筋の帯磁状況に違いが生じ得るかを検討する必要がある．本節では，有限要素法による 3 次元静磁場解析により，鉄筋内部および隅角部周辺の帯磁状況を明らかにする．

#### 2.1.1 解析概要

##### (1) 想定した事例

診断対象箇所として図 2-1 に示すような T 型橋脚梁部のスターラップ曲げ加工部での破断を想定した．スターラップは鉄筋径が D16 でかぶりは 78.5mm，隅角部の主鉄筋の径は D32 とした．T 型橋脚の上部には 50mm の厚さのゴム支承をはさんで PC 桁が存在し，桁の内部の表面から 50mm の位置に径 D13 の鉄筋が配置されているものとする．

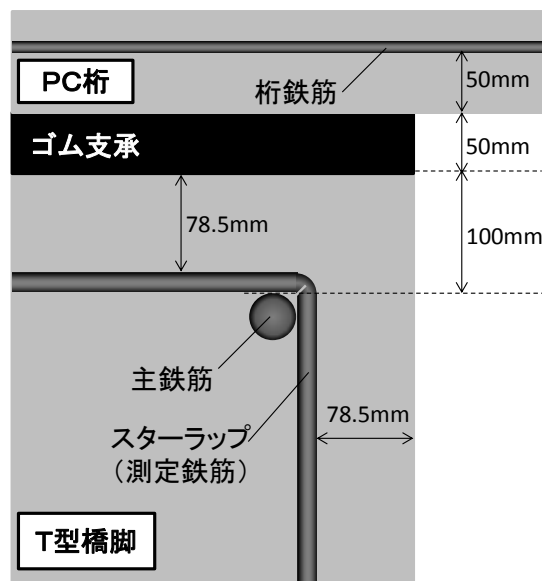


図 2-1 想定した配筋状況

##### (2) 解析方法

解析ソフトは「photo-MAG(ver. 7.0000105)」を使用した．要素特性は 8 節点 1 次，要素数は 267,922，節点数は 275,407 である．図 2-2 に解析対象のメッシュ図を示す．鉄筋の長さは主鉄筋・桁鉄筋が 2000mm，スターラップが 1000mm×1000mm である．表 2-1 に解析ケース一覧を示す．物性に関しては，コンクリートを非磁性体と見なし，空気と同じく比透磁率を 1 とした．軟磁性材料である鉄筋は磁気ヒステリシス特性を考慮し，その特性の表現は既往の研究で行われている両面診断での解析を参考に Potter-Schmulian の式<sup>1)</sup>の重ね合わせで表現された式(2.1)を使用した<sup>2)</sup>．

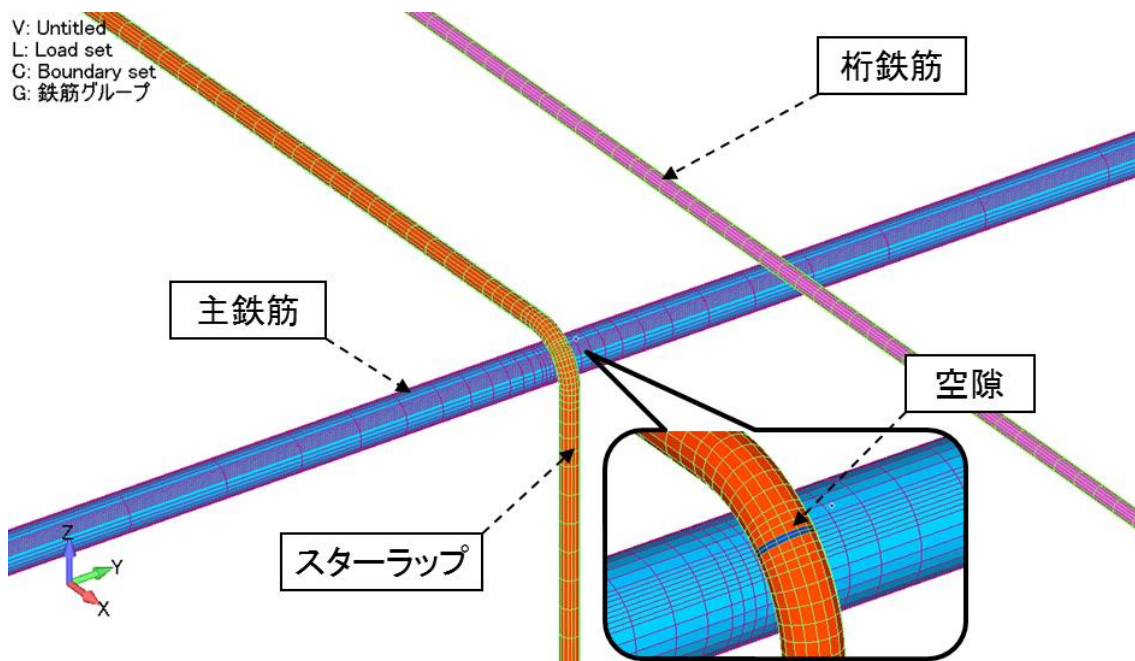


図 2-2 解析対象メッシュ図

表 2-1 解析ケース一覧

ケース	かぶり(mm)	主鉄筋	桁鉄筋	鉄筋状態
2-2	78.5	あり	あり	健全
2-1				破断
3-2			なし	健全
3-1				破断

$$M = \sum_{i=1}^2 M_{s_i} \left[ \operatorname{sgn} \alpha_i - \alpha_i \left\{ 1 + \tanh \left( \frac{H_c - H \operatorname{sgn} \alpha_i}{H_c} \tanh^{-1} \frac{M_{r_i}}{M_{s_i}} \right) \right\} \right] \quad (2.1)$$

ここに,

$$\alpha_i = \pm \frac{M_{s_i}}{M_{s_i} + M_{r_i}} \quad (i = 1, 2) \quad (2.2)$$

$M$  : 鉄筋の磁化

$H$  : 磁場の強さ

$M_s$  : 飽和磁化

$M_r$  : 残留磁化

$H_c$  : 保磁力

解析で使用した保磁力，飽和磁化および残留磁化の値を表 2-2 に示す．破断の有無はスターラップ隅角部に幅 2mm の空隙を設け，健全の場合は鉄筋，破断の場合は空気と物性を変化させることで表現した．また，桁鉄筋の有無もパラメータとした．

表 2-2 解析の保磁力，飽和磁化および残留磁化

	X 成分	Y 成分	Z 成分
$H_c$ (A/m)	417	417	417
$M_{r1}$ (A/m)	132113	132113	132113
$M_{s1}$ (A/m)	784548	784548	784548
$M_{r2}$ (A/m)	600000	600000	600000
$M_{s2}$ (A/m)	600100	600100	600100

### (3) 着磁方法

解析に用いた外場磁石の概要を図 2-3 に，磁石の動かし方の詳細を表 2-3 に示す．ここで，スターラップ曲げ加工部のかぶり上縁の交点を原点とした．解析における磁石の動かし方は表 2-3 のステップごとに鉄筋のヒステリシスを引き継いで静磁場解析を行うものである．

以下に着磁過程の概要を記す．ここで，着磁過程④～⑥はスターラップがピッチ 300mm で配置してあるものと仮定して，隣の鉄筋直上でのストロークを想定した動かし方である．

過程①(step 1～7)：測定鉄筋直上( $Y = 0$ )にて，隅角部に磁石を接近させる．

過程②(step 8～38)：測定鉄筋直上( $Y = 0$ )にて，ストローク 500mm で 1.5 往復させる．

過程③(step 39～45)：測定鉄筋直上( $Y = 0$ )にて，磁石を測定面から遠ざける．

過程④(step 46～52)：300mm 隣( $Y = 300$ )にて，隅角部に磁石を接近させる．

過程⑤(step 53～83)：300mm 隣( $Y = 300$ )にて，ストローク 500mm で 1.5 往復させる．

過程⑥(step 84～90)：300mm 隣( $Y = 300$ )にて，磁石を測定面から遠ざける．

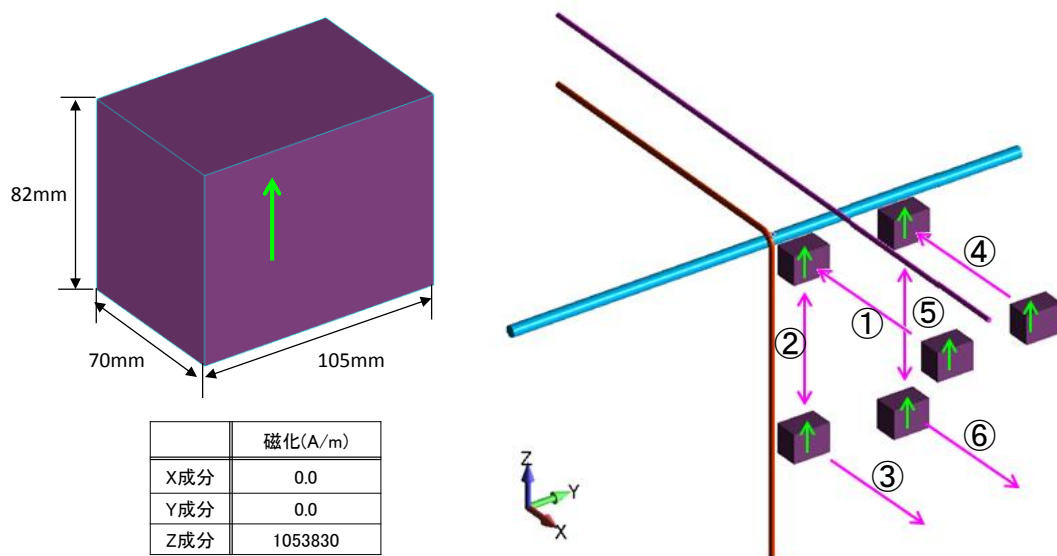


図 2-3 外場磁石概要

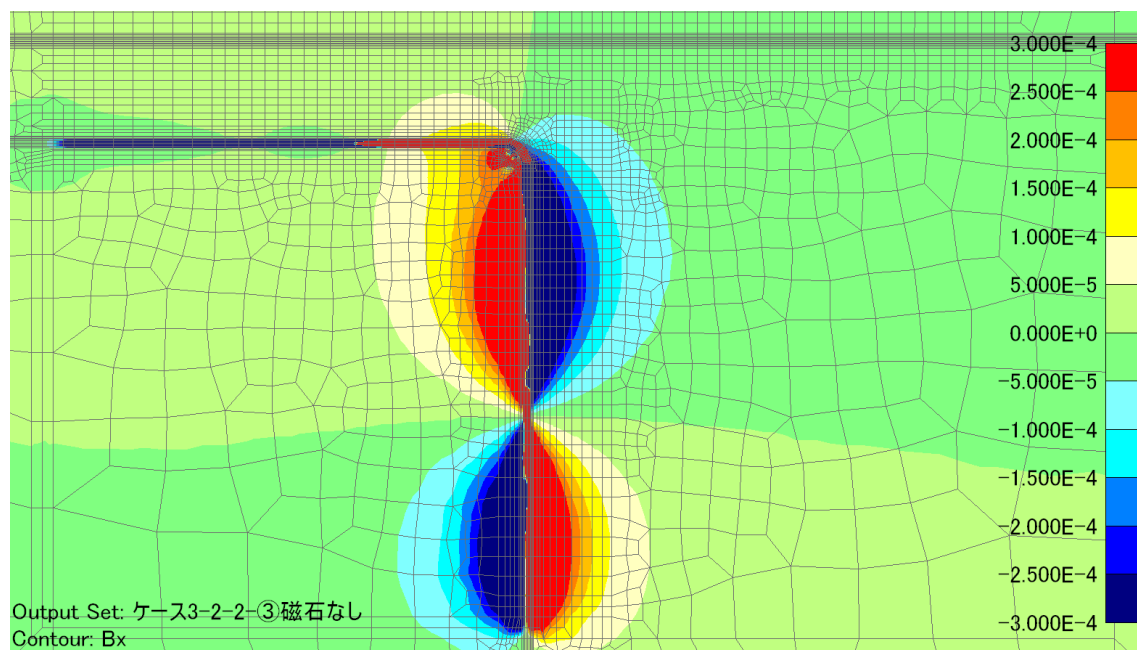
表 2-3 外場磁石の動かし方

①	step	1	2	3	4	5	6	7				
	X (mm)	1090	840	590	390	290	190	150				
	Y (mm)	0										
	Z (mm)	-11.5										
②	step	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
		28	27	26	25	24	23	22	21	20	19	
			29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
	X (mm)	123.5										
	Y (mm)	0										
	Z (mm)	-11.5	-61.5	-111.5	-161.5	-211.5	-261.5	-311.5	-361.5	-411.5	-461.5	-511.5
③	step	39	40	41	42	43	44	45				
	X (mm)	150	190	290	390	590	840	1090				
	Y (mm)	0										
	Z (mm)	-511.5										
④	step	47	48	49	50	51	52	53				
	X (mm)	1090	840	590	390	290	190	150				
	Y (mm)	300										
	Z (mm)	-11.5										
⑤	step	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64
		74	73	72	71	70	69	68	67	66	65	
			75	76	77	78	79	80	81	82	83	84
	X (mm)	123.5										
	Y (mm)	300										
	Z (mm)	-11.5	-61.5	-111.5	-161.5	-211.5	-261.5	-311.5	-361.5	-411.5	-461.5	-511.5
⑥	step	85	86	87	88	89	90	91				
	X (mm)	150	190	290	390	590	840	1090				
	Y (mm)	300										
	Z (mm)	-511.5										

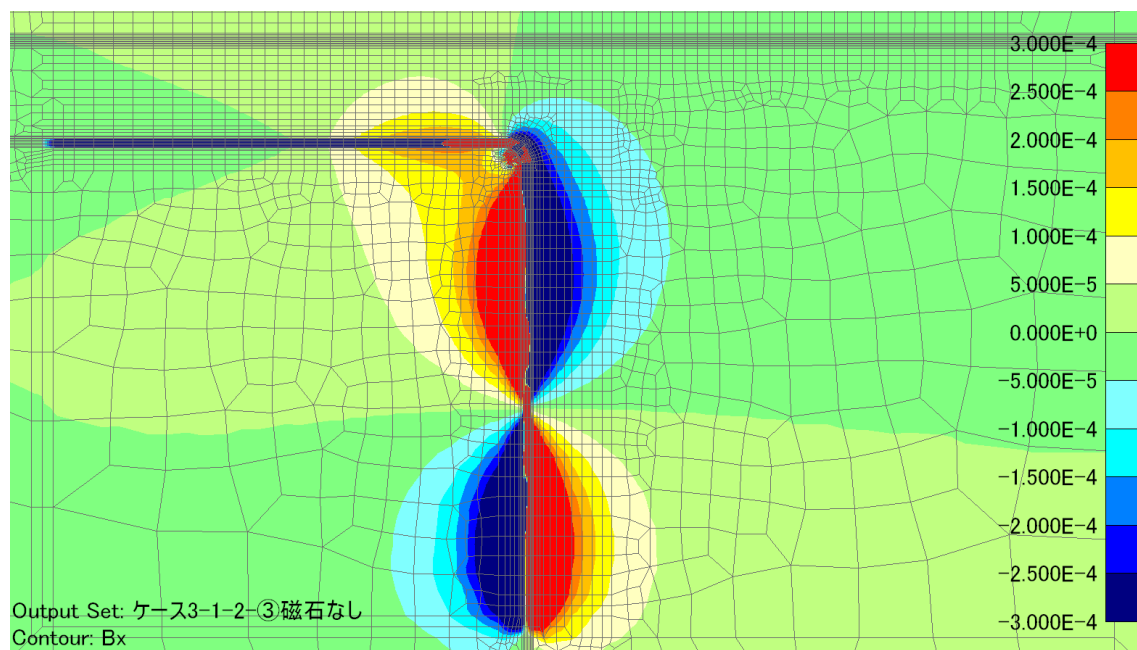
## 2.1.2 鉄筋隅角部周辺の磁束密度分布

### (1) スターラップの帯磁状況

ケース 3-1, 3-2 において, スターラップ直上で磁石を操作した時点 (着磁過程①～③) での磁束密度成分  $B_x$  と  $B_z$  のコンターをそれぞれ図 2-4 と図 2-5 に示す.

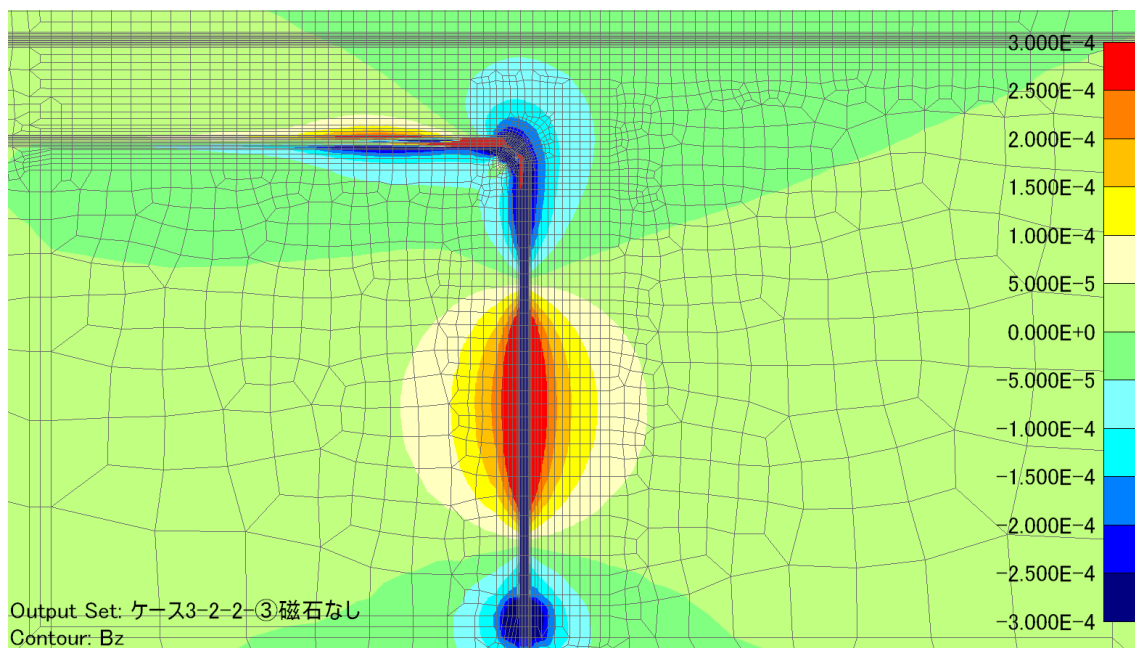


(a) 健全

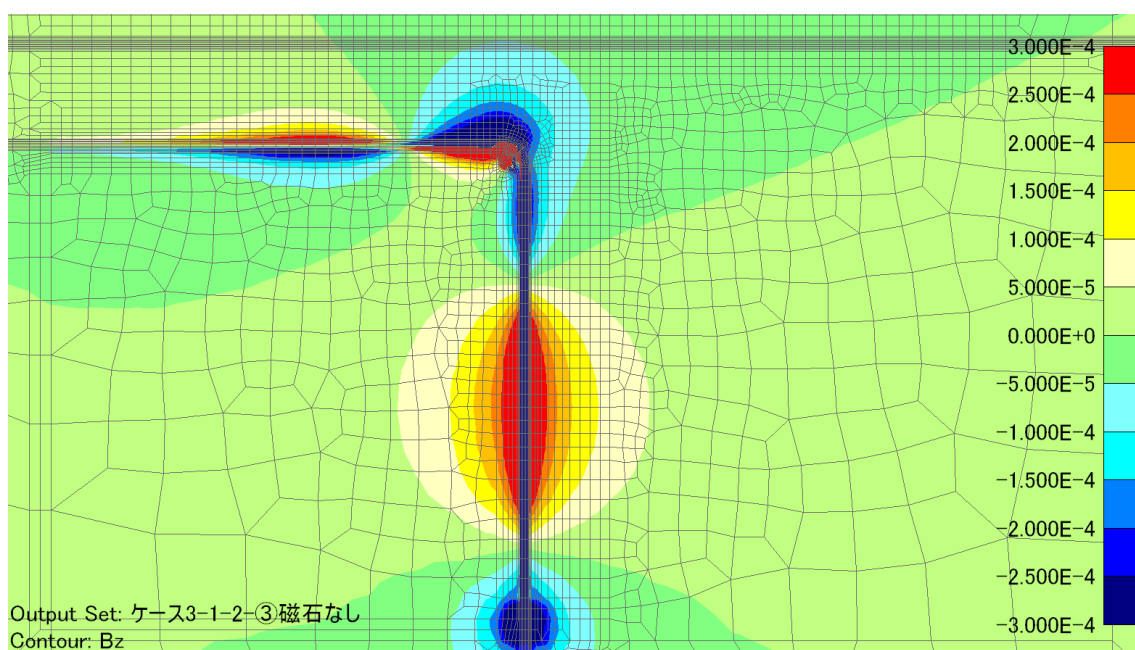


(b) 破断

図 2-4 ケース 3-1, 3-2 着磁過程③後 磁束密度コンターXZ 断面  $B_x$  成分 (→)



(a) 健全



(b) 破断

図 2-5 ケース 3-1, 3-2 着磁過程③後 磁束密度コンターXZ 断面 Bz 成分 (↑)

図 2-4 からスターラップ上面側の内部を磁束が流れる方向と、側面側で磁束が流入する S 極と流出する N 極が存在し、同様に図 2-5 からスターラップ側面側内部の磁束の方向および上面側での磁束の流入・流出箇所がわかる。これらを合わせて考えると、スターラップの帯磁状況は図 2-6 に示すような模式図になる。

図 2-6 で側面側のスターラップに着目すると、健全・破断ともに着磁終了位置付近を境目に隅角部側で S 極、端部側で N 極に帯磁していることがわかる。想定した側面の診断面（かぶり：78.5mm）における測定面に垂直な方向の磁束密度成分  $B_x$  と隅角部からの位置の関係を図 2-7 に示す。着磁終了位置付近（隅角部から 500mm 程度離れた位置）でほぼ  $0\mu T$  となり、測定磁束密度のグラフに破断の有無による違いは着磁過程③終了時点では小さい。これはかぶり 78.5mm で着磁を行った結果、鉄筋直上での着磁終了位置の影響が強く残ったためと考えられる。

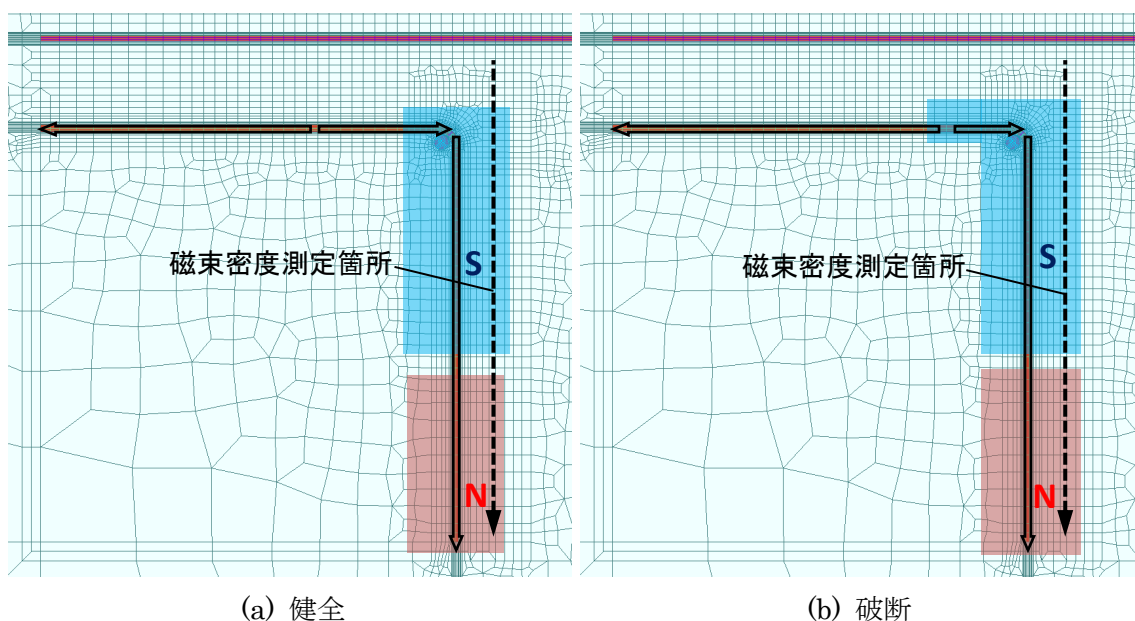


図 2-6 ケース 3-1, 3-2 着磁過程③後 スターラップ帯磁状況模式図

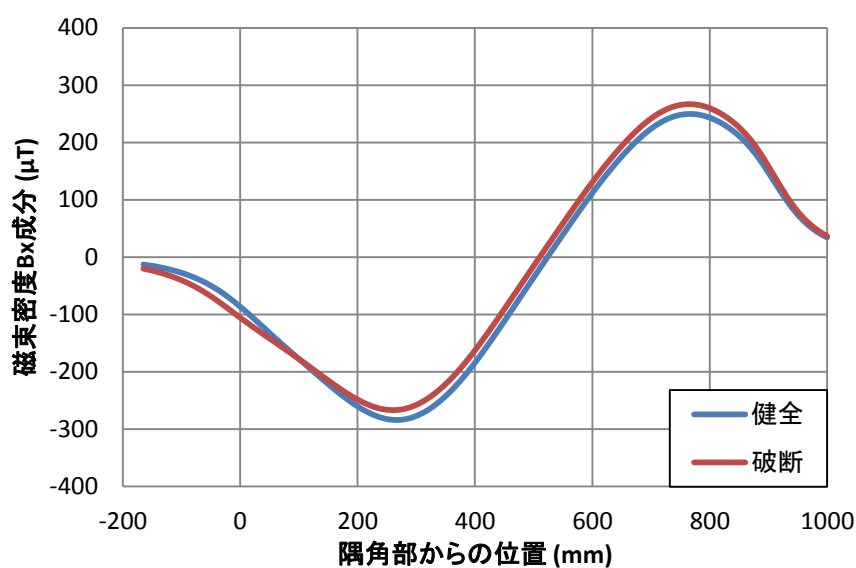
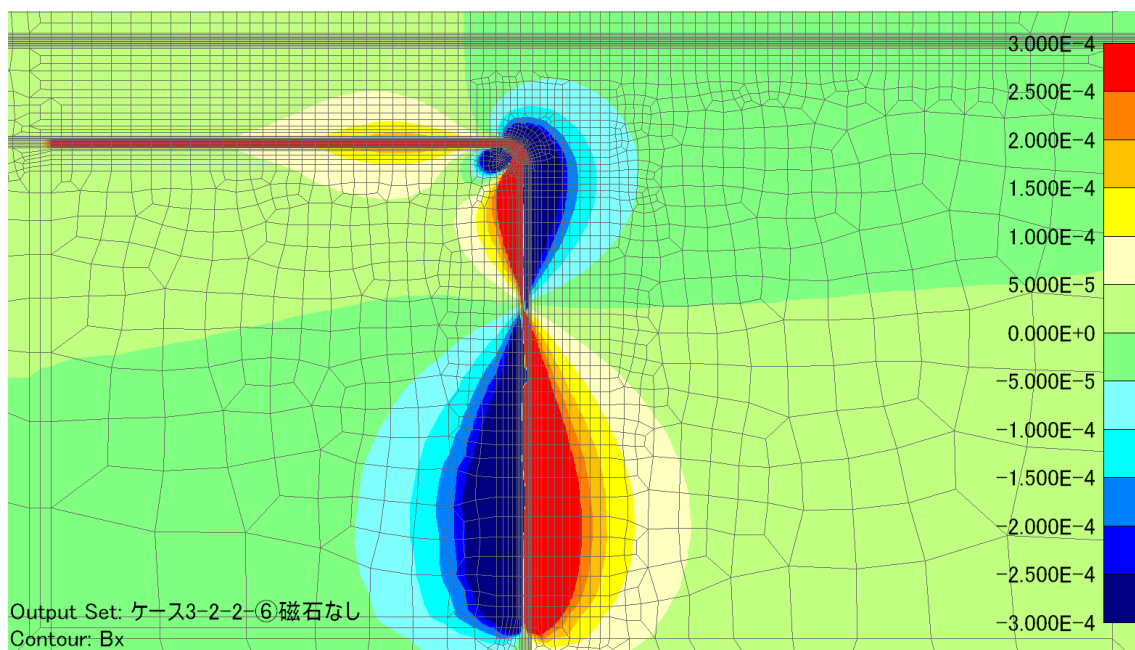


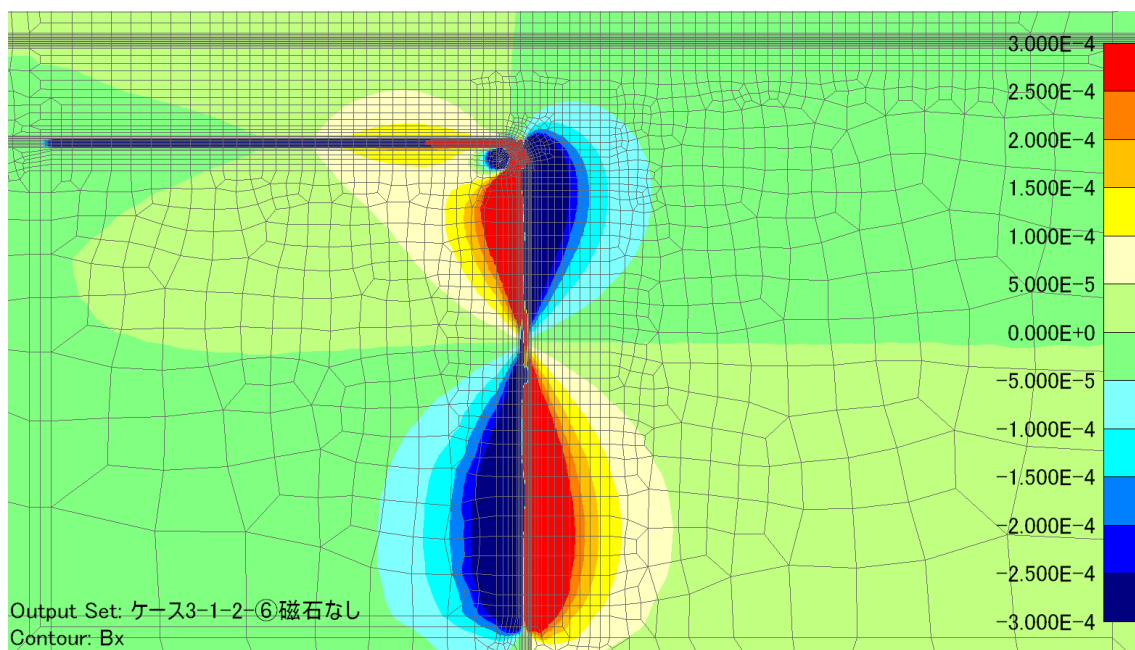
図 2-7 ケース 3-1, 3-2 着磁過程③後 測定面の磁束密度成分  $B_x$



次に、スターラップ直上から 300mm 離れた位置で磁石を操作した後（着磁過程④～⑥）の磁束密度成分  $B_x$  と  $B_z$  のコンターをそれぞれ図 2-8 と図 2-9 に示す。また、図 2-8 と図 2-9 のスターラップ内部磁束の方向と流入・流出の箇所から推定される帯磁状況の模式図を図 2-10 に示す。

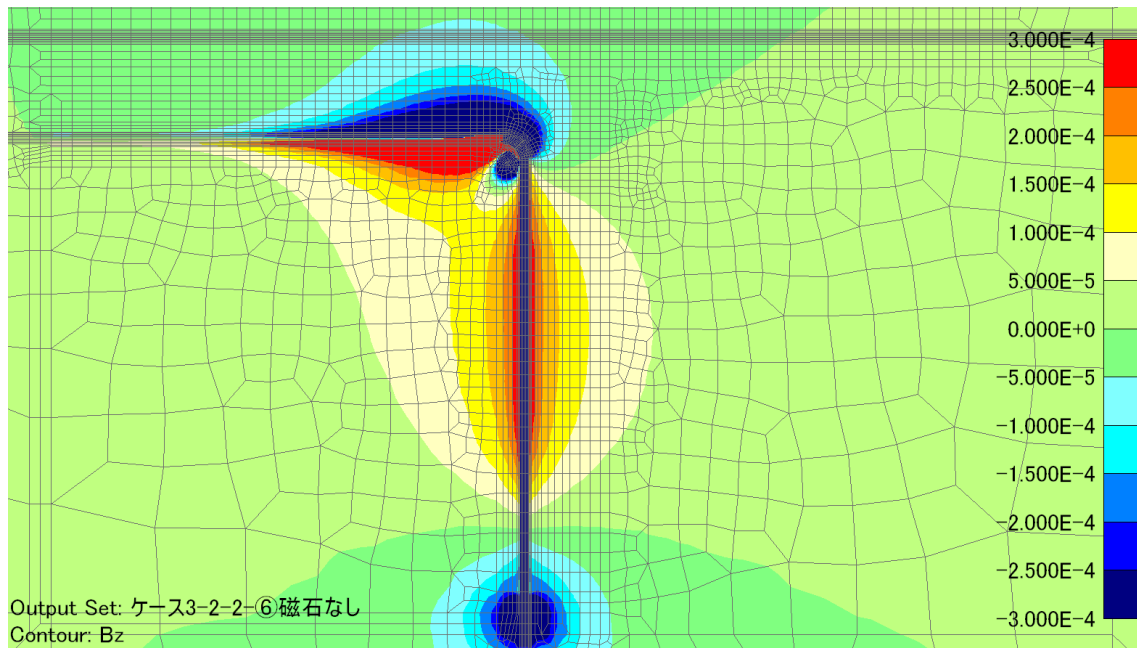


(a) 健全

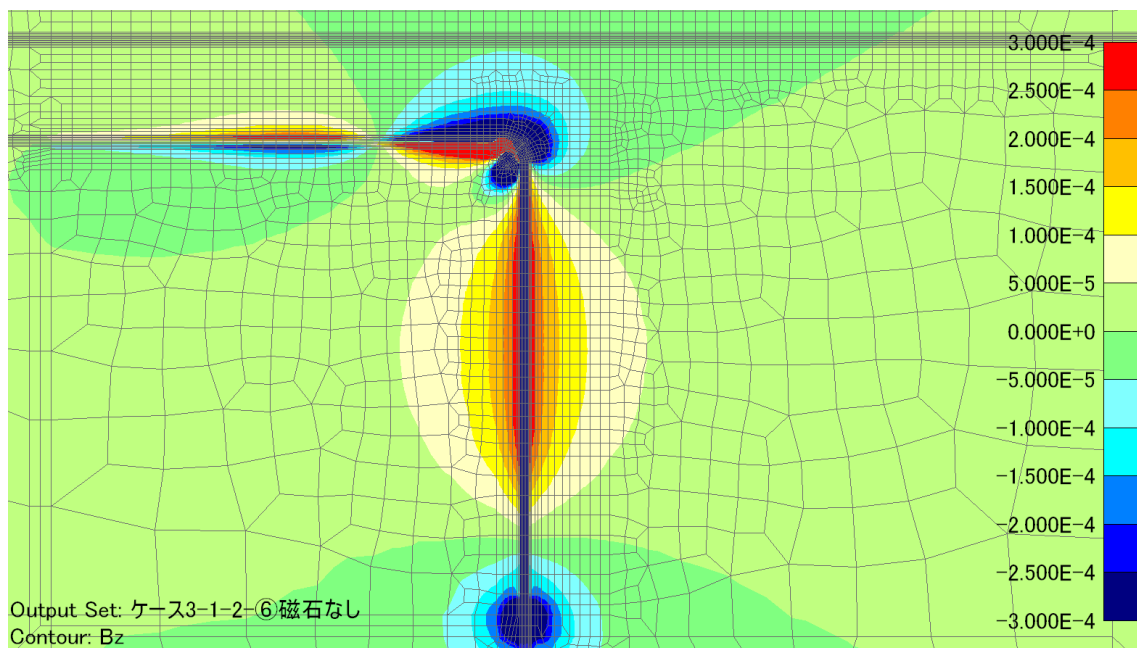


(b) 破断

図 2-8 ケース 3-1, 3-2 着磁過程⑥後 磁束密度コンターXZ 断面  $B_x$  成分 (→)



(a) 健全



(b) 破断

図 2-9 ケース 3-1, 3-2 着磁過程⑥後 磁束密度コンターXZ 断面 Bz 成分 (↑)

図 2-10 より, 健全では S 極側に帯磁した部分がスターラップ上面側にまで及ぶのに対し, 破断では隅角部に S 極が集中している. 着磁過程①～③と測定鉄筋直上から磁束を与えた後, 着磁過程④～⑥を経ることでスターラップの上面側・側面側どちらも偏りなく帯磁でき, その結果, 帯磁状況に違いが生じたと考えられる.

図 2-10 中の磁束密度測定箇所（かぶり：78.5mm）での  $B_x$  成分を図 2-11 に示す．健全・破断ともに隅角部から 100mm 程度離れた位置で下に凸，750mm 程度離れた位置で上に凸のピークを持つグラフの形状となるが，図 2-7 と比較して  $B_x$  が  $0\mu\text{T}$  となる位置が健全では 300mm，破断では 400mm 程度隅角部から離れた位置となり明確な差が見られる．このことから，隅角部に対して片面側からのみの着磁および測定で得られる磁束密度のグラフ形状を評価することによる破断の有無の診断の可能性が示された．

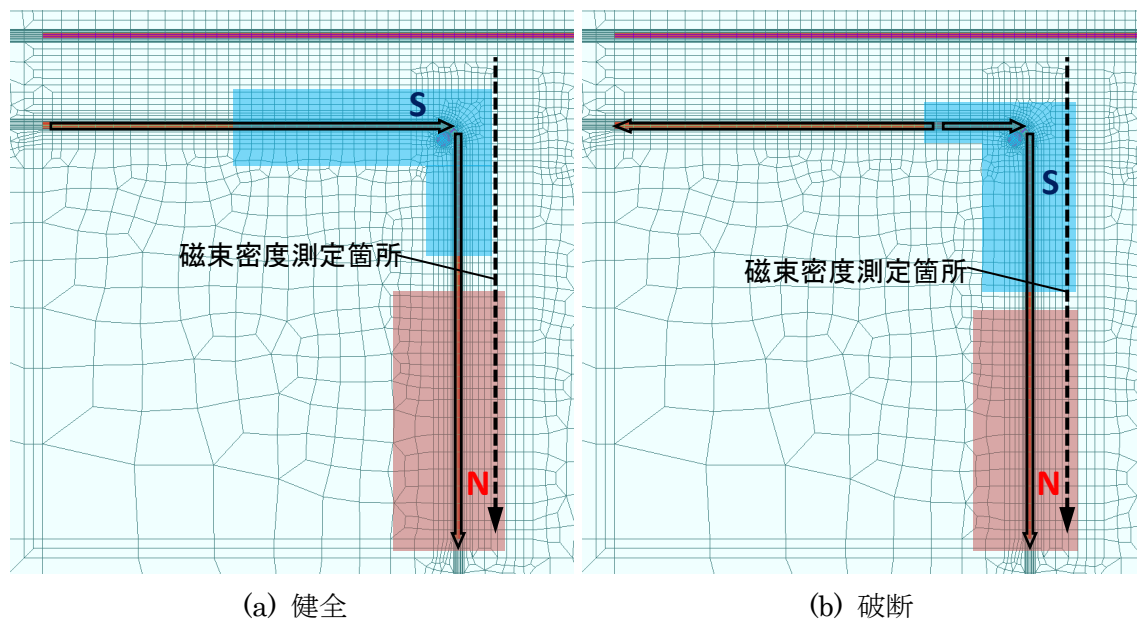


図 2-10 ケース 3-1, 3-2 着磁過程⑥後 スターラップ帯磁状況模式図

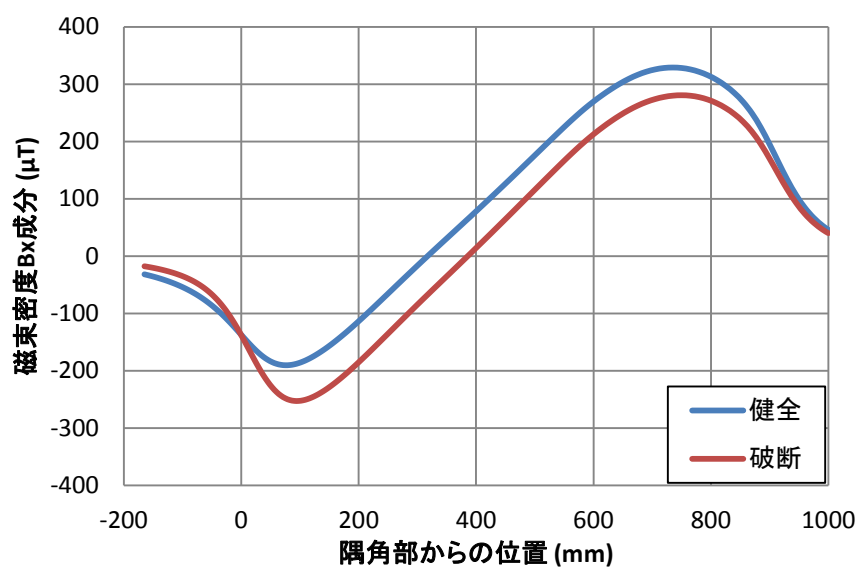
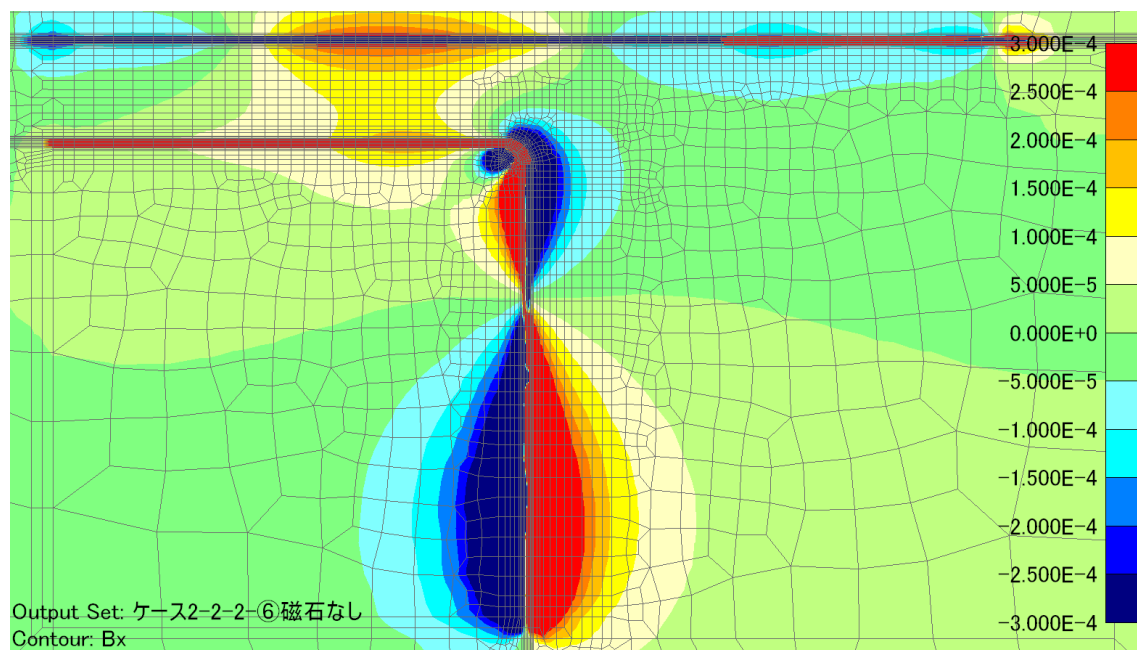


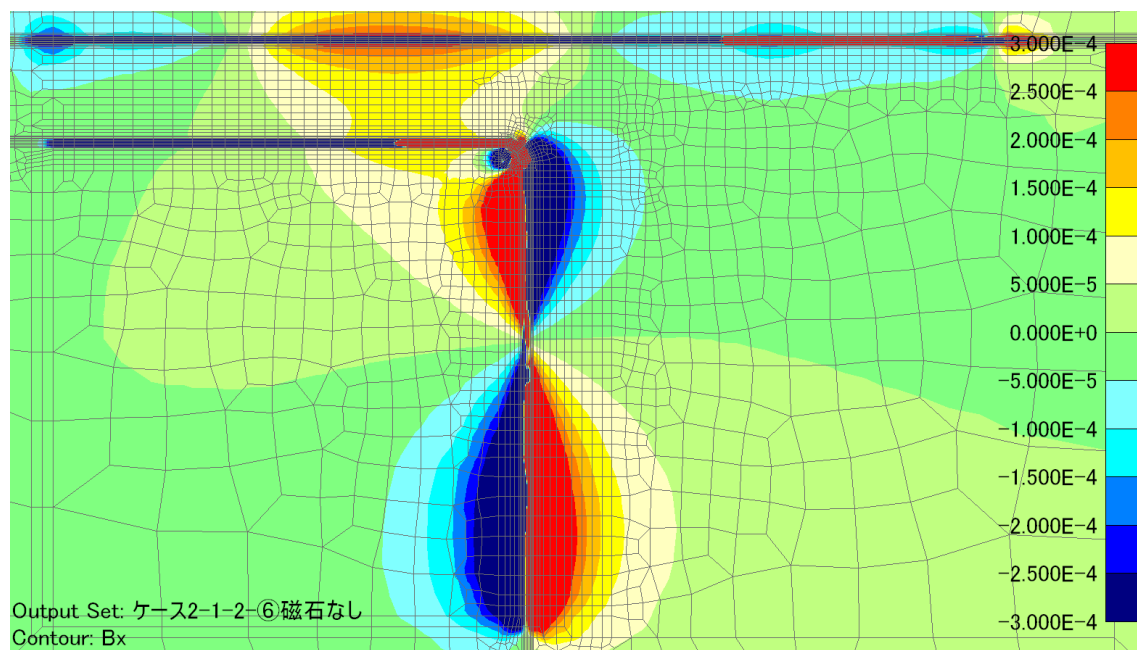
図 2-11 ケース 3-1, 3-2 着磁過程⑥後 測定面の磁束密度成分  $B_x$

## (2) 桁鉄筋の帯磁状況

桁鉄筋を配置したケース 2-1, 2-2 の着磁終了後の磁束密度成分  $B_x$  と  $B_z$  をそれぞれ図 2-12 と図 2-13 に示す。また、図 2-12 と図 2-13 からスターラップおよび桁鉄筋内部磁束の方向と流入・流出の箇所から推定される帯磁状況の模式図を図 2-14 に示す。

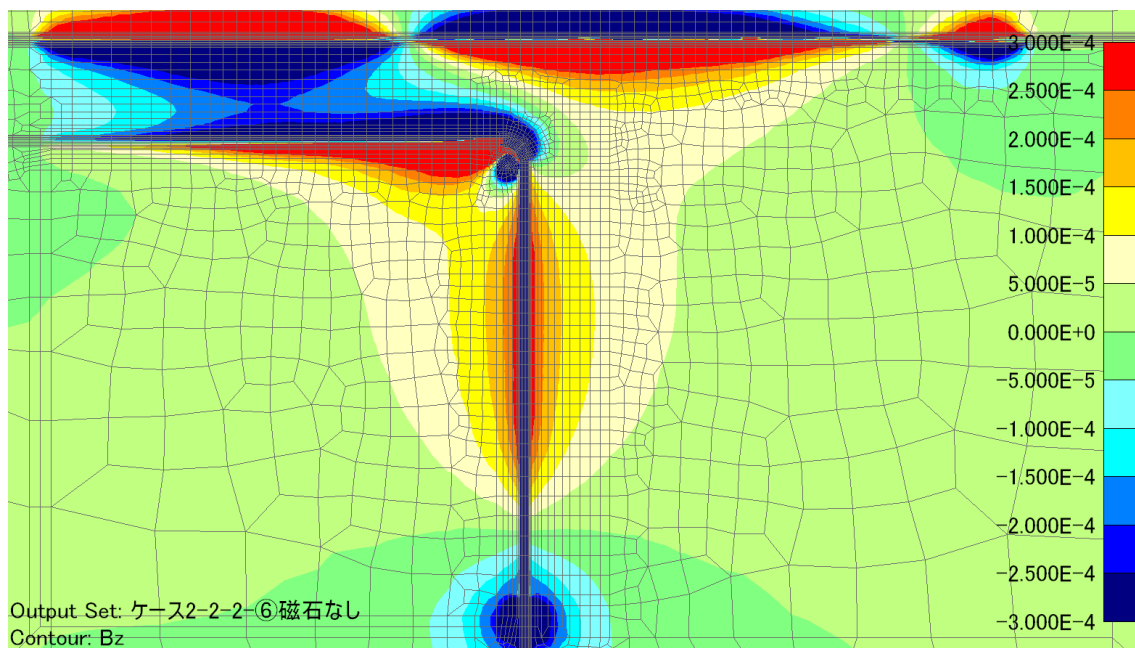


(a) 健全

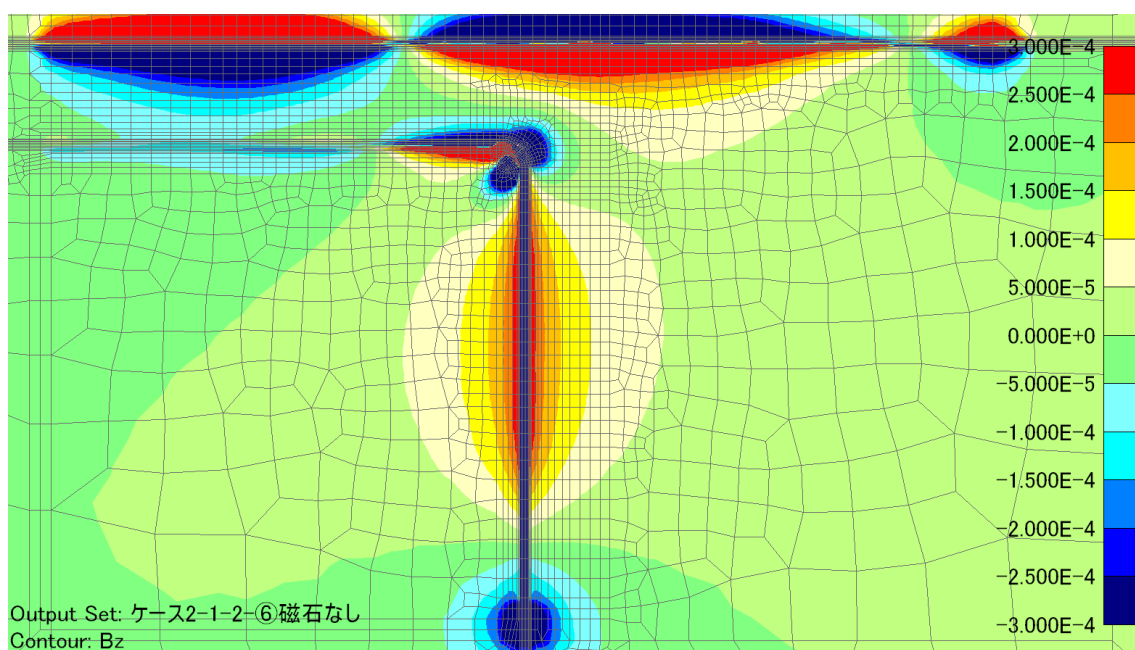


(b) 破断

図 2-12 ケース 2-1, 2-2 着磁過程⑥後 磁束密度コンターXZ 断面  $B_x$  成分 (→)



(a) 健全



(b) 破断

図 2-13 ケース 2-1, 2-2 着磁過程⑥後 磁束密度コンターXZ 断面 Bz 成分 (↑)

図 2-14 よりスターラップに関しては、桁鉄筋が存在する場合でも図 2-10 と同様に側面側からの着磁で上面側鉄筋まで帯磁できていることが確認できる。桁鉄筋については、過程②および⑤で磁石の N 極が近づいたことにより磁束が流入し、図 2-14 に示すように帯磁されたことがわかる。

図 2-14 中の磁束密度測定箇所（かぶり：78.5mm）での  $B_x$  成分を図 2-15 に示す。桁鉄筋が帯磁された結果、その周辺に N 極から S 極への磁束の流れが生じ、桁鉄筋配置箇所付近の  $B_x$  成分に正の方向へ影響を及ぼしているが、隅角部から端部側での磁束密度  $B_x$  成分の差は図 2-11 と同様に生じている。このことから、本解析で想定したスターラップ上縁からの距離 178.5mm という条件下では、桁鉄筋が存在する場合でも同様に破断を検知できると考えられる。

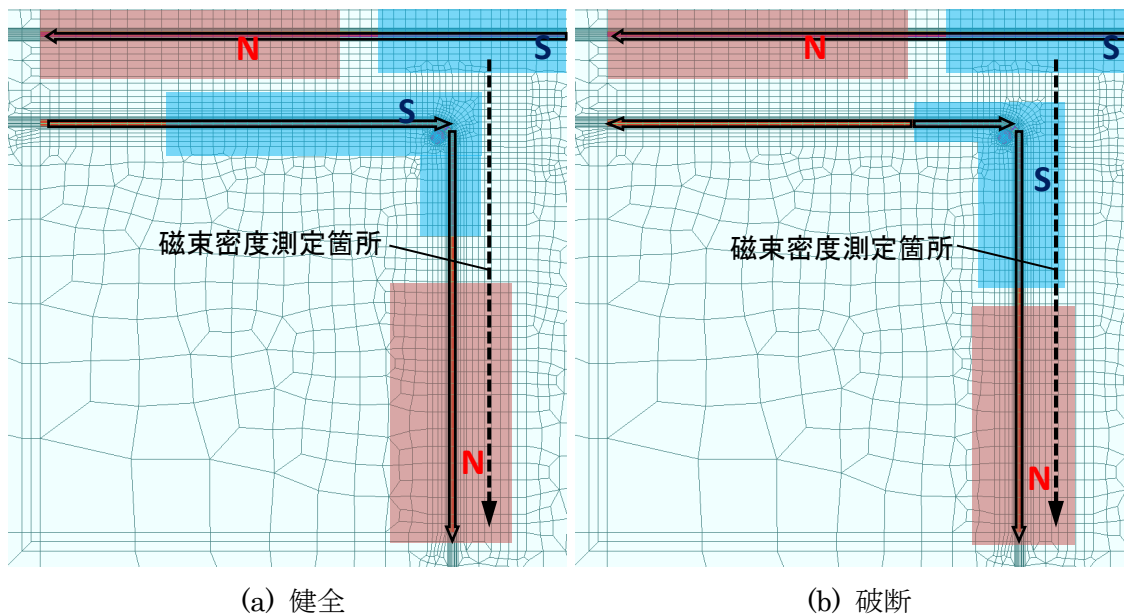


図 2-14 ケース 2-1, 2-2 着磁過程⑥後 スターラップ帯磁状況模式図

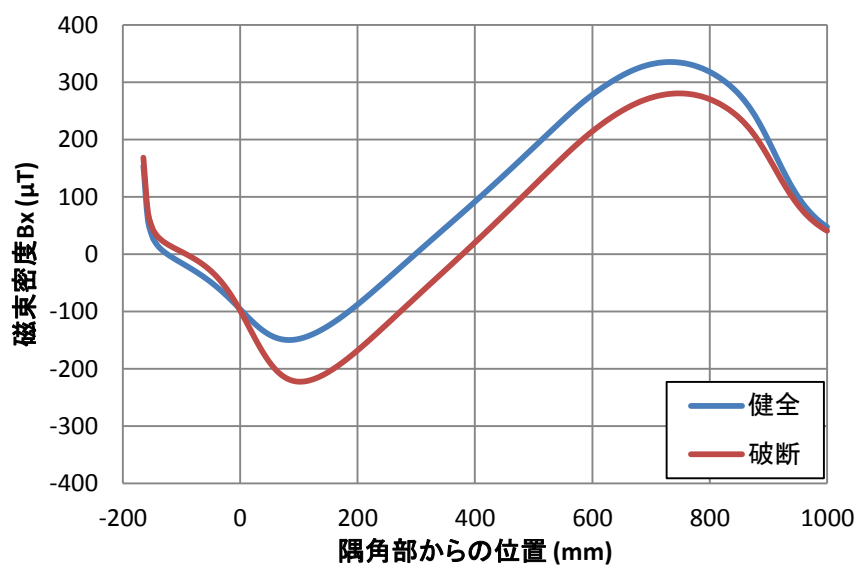


図 2-15 ケース 2-1, 2-2 着磁過程⑥後 測定面の磁束密度成分  $B_x$

### (3) 磁束密度のグラフ形状の評価

図 2-11, 図 2-15 の測定面での磁束密度より, 健全・破断ともに隅角部から 80~100mm 程度離れた位置に下に凸のピークを持つことから, 破断の有無による帯磁状況の違いを評価する方法として, まず測定磁束密度のグラフのピークの値 (ピーク値), あるいはピークが表れる位置 (ピーク位置) を指標として用いることが考えられる. これらはグラフの形状を評価する指標として用いることができるが, 実際の現場では測定磁束密度が地磁気等の環境磁場の影響を受け値が上下し得ることが懸念される. 地磁気とは, 地球を北が S 極, 南が N 極とみなした大きな磁石によって生じる磁場のことであり, 日本では水平方向に 26~35 $\mu$ T 程度の強さの磁気が生じている<sup>3)</sup>. これは同じ診断対象でも測定する磁束密度が方角により $\pm 30\mu$ T 程度上下することを意味しており, 測定結果の絶対値ではなくピークの形状を相対的に評価する指標が必要である.

以上を踏まえ本研究では相対的な評価を行うために, 1 つの測定磁束密度グラフ内での測定値の差分をとることでこの影響をキャンセルする方針とした. ここでは「補正ピーク値」と「最大変化率」の 2 つの指標を用いるものとする.

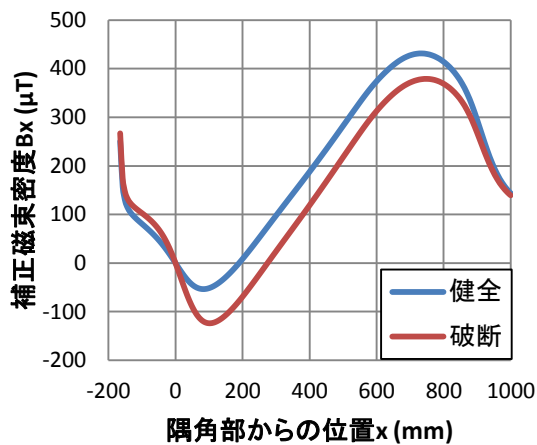
補正ピーク値は従来の両面診断で用いられている判断指標に準じた値であり<sup>4)</sup>, 図 2-16 に示すように測定結果から隅角部での磁束密度を差し引いた補正磁束密度のピークの絶対値をとることで, ピークの山の高さを評価する指標である. 破断の方がピーク位置が大きい傾向にあること, ピーク位置以下において破断の方がグラフの傾きが急であるという特徴から, 破断の有無による測定磁束密度の違いを明確に示す指標であると考えられる.

他の指標としては, 破断の有無によるグラフの傾きの違いを評価する方法が考えられる. グラフの傾きを表す方法として, 以下のように区間平均変化率を定義した.

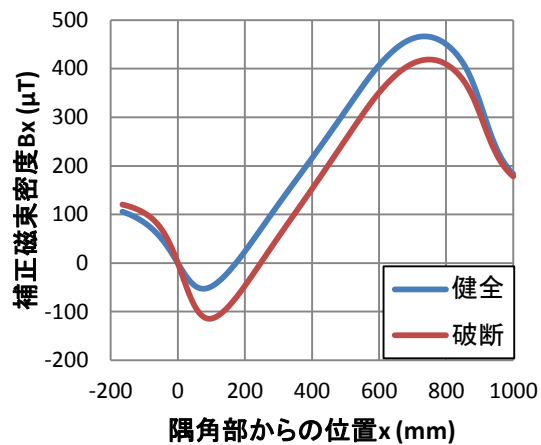
$$\text{区間平均変化率 } [\mu\text{T} / \text{mm}] = \frac{\text{磁束密度の増減 } [\mu\text{T}]}{\text{横軸 (隅角部からの位置) の区間 } [\text{mm}]}$$

図 2-11, 図 2-15 から得られる区間平均変化率を図 2-17 に示す. ここで, 磁束密度の増減をとる区間は測定の際のノイズの影響を考慮し 30mm で一定とした. 図 2-17 より, 隅角部付近 ( $x = -100 \sim 100$ ) で健全と破断の区間平均変化率に違いが見られ, またその極小値が存在することがわかる. このことから, 区間平均変化率の隅角部周辺 ( $\pm 100\text{mm}$ ) の極小値の絶対値を「最大変化率」と定義し, 測定磁束密度のピークの山の傾きを評価する指標とした.



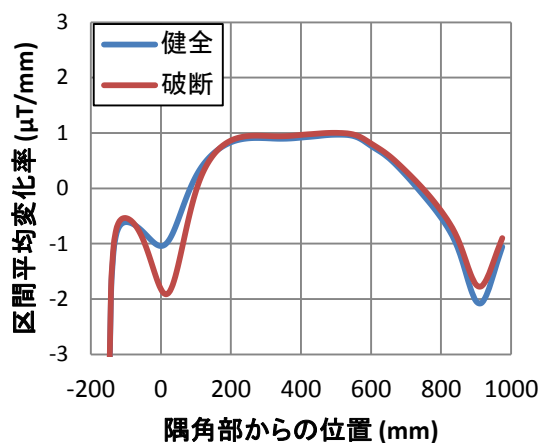


(a) 桁鉄筋あり

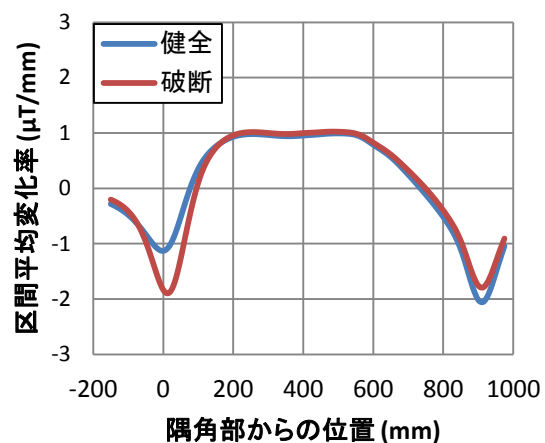


(b) 桁鉄筋なし

図 2-16 補正磁束密度  $B_x$  成分



(a) 桁鉄筋あり



(b) 桁鉄筋なし

図 2-17 磁束密度  $B_x$  成分の区間平均変化率

図 2-11, 図 2-15 から得られるピーク値, ピーク位置と図 2-16, 図 2-17 から得られる補正ピーク値, 最大変化率を図 2-18 に示す. 図 2-18 の(a), (b)より, ピーク値・ピーク位置はどちらも健全より破断の値が大きく破断の有無を明確に分けているが, 桁鉄筋が存在することによりピーク値は絶対値が小さく, ピーク位置は大きくなることがわかる. 一方, 図 2-18 の(c), (d)より, 補正ピーク値と最大変化率はどちらも破断が健全よりも十分に大きく, かつ桁鉄筋の有無による値の変動が小さいことから, 桁鉄筋の影響をほとんど受けずに破断の有無を診断できる指標であると考えられる.

以上より, 隅角部の片面から測定鉄筋長手方向に着磁を行うことで破断の有無による帯磁状況の違いが生じ, なおかつその差を磁束密度の測定が行える範囲で得られることが分かった.



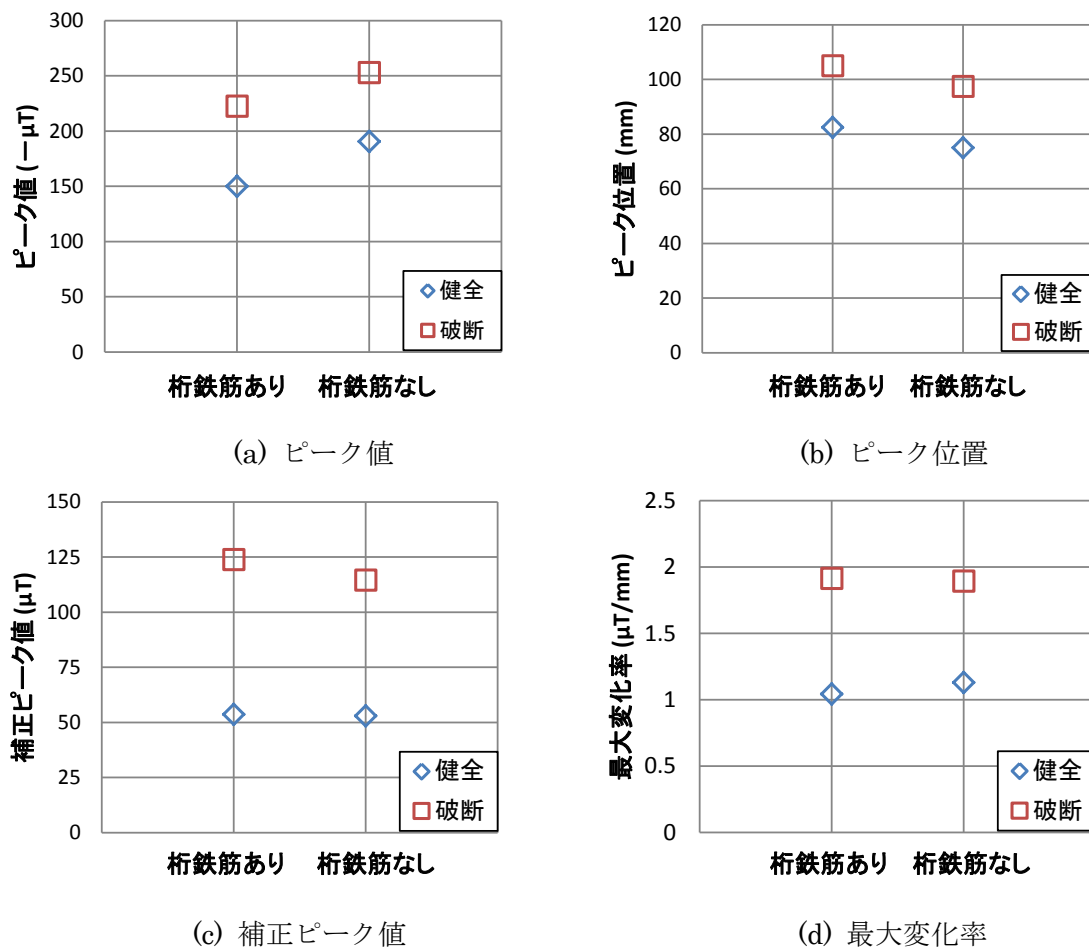


図 2-18 各指標の桁鉄筋による影響

## 2.2 計測手法の検討

前節では解析の結果より，コンクリート表面の磁束密度グラフから得られる補正ピーク値，最大変化率を用いて破断を診断できる可能性が示された．本節では，この 2 つの指標に関して破断の有無による差がより大きく，診断が容易になる着磁の範囲について実験を行い検討する．

### 2.2.1 実験概要

#### (1) 供試体概要

木製の実験台に鉄筋を固定し実験を行った．実験台の外観を写真 2-1 に示す．実験台は着磁・測定をより容易かつ正確に行うため，図 2-1 に示した想定事例を  $90^\circ$  回転した状況とした．作成には非磁性体の材料として木製の角材と板材，真鍮製の釘，プラスチックのケーブルタイを使用した．実験の環境としては，磁気シールドの施されていない一般的な室内環境で行った．鉄筋は写真 2-2 に示すようにケーブルタイで固定し，破断の場合は厚さ 2mm の木片をはさむことで破断ギャップを一定とした．



写真 2-1 実験台外観



写真 2-2 測定鉄筋隅角部

## (2) 使用鉄筋

本実験で使用した鉄筋は，スターラップが SD295 の D16，隅角部の主鉄筋が SD345 の D32 であり，桁鉄筋は配置していない．鉄筋の長さは端部の影響を考慮し，主鉄筋を 1500mm，スターラップを 1800mm とした．スターラップについては，ベンダー（写真 2-3）を用いて中央で冷間曲げ加工を行った．曲げ角度は  $90^\circ$ ，曲げ内半径は土木学会の規定値を参考に最小値の  $2\phi : 32\text{mm}$  を下回らず最も近い値である  $35\text{mm}$  とした<sup>6)</sup>．

破断鉄筋に関しては曲げ加工部においてバンドソー（写真 2-4）を用いて  $45^\circ$  の角度で切断した．加工済みのスターラップおよび主鉄筋は写真 2-6 に示す消磁気（東洋磁気工業株式会社：ハンディタイプ消磁気 RMK-01）を用いて消磁を行った後，実験台に設置した．



写真 2-3 ベンダー



写真 2-4 バンドソー

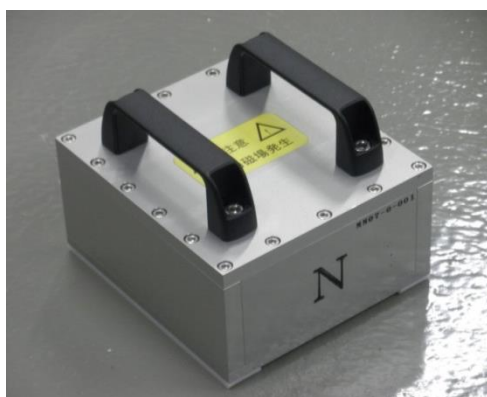


写真 2-5 消磁気

### (3) 診断装置

本実験では(株)四国総合研究所の M.EYE チェッカーを診断装置として使用した。装置の外観を写真 2-6 に示す。診断装置は鉄筋を磁化するための永久磁石を内蔵した磁石ユニット (MM1-00-001) と、測定面に垂直な方向成分の磁束密度を測定する磁気計測ユニット (MS1-00-001) の 2 つからなる。

磁石ユニットは寸法が 165mm×180mm×134mm, 重量が約 8kg で、底面から 150mm 離れた位置における長手方向の磁束密度は約 7mT である。磁気計測ユニットは寸法が 140mm×230mm×125mm, 重量が約 1.6kg で、測定面に対し垂直方向の磁束密度成分を  $-300\sim 300\mu\text{T}$  の範囲で移動距離 1mm ごとに測定・記録できる。



(a) 磁石ユニット



(b) 磁気計測ユニット

写真 2-6 診断装置外観

### (4) 実験要因

本実験では図 2-19 に示すようにスターラップ隅角部を原点 ( $x=0$ ) とし、磁石ユニットの中心を基準とした着磁開始位置および着磁終了位置をパラメータとした。実験要因一覧を表 2-4 に示す。着磁の方法については、前節の解析と同様にスターラップ直上で着磁開始位置から終了位置までを 1.5 往復させた後、300mm 隣で同範囲を 1.5 往復させた。着磁終了後、磁気計測ユニットを用いてスターラップ直上で  $x = -150\sim 700\text{mm}$  の範囲の磁束密度を計測した。実験数は各要因につき 2 回ずつ行った。

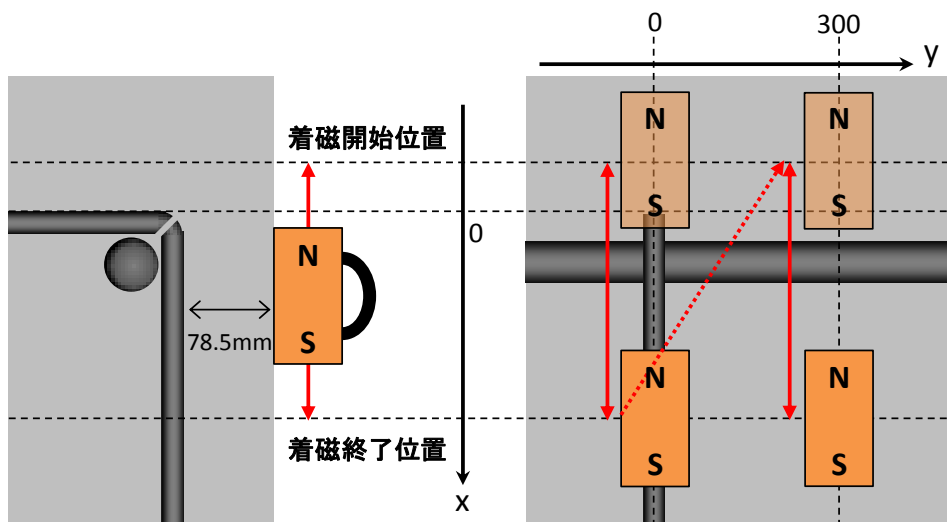


図 2-19 着磁方法

表 2-4 実験要因一覧

かぶり(mm)	着磁範囲(mm)		鉄筋状態
	開始位置	終了位置	
78.5	-200	500	健全, 破断
	-100		
	0		
	100		
	200		
	300		
	0	200	
		300	
		400	
		600	
		700	

## 2.2.2 着磁範囲の影響

### (1) 測定結果および診断指標

磁束密度の測定結果の一例を図 2-20 に、補正磁束密度および一定区間を 30mm とした区間平均変化率を図 2-21 に示す。ここで着磁開始位置は  $x = 0$ 、着磁終了位置は  $x = 500$  である。健全・破断ともに  $x = 100$  付近で下に凸の形状となり、破断の場合はピークの山が高く急峻になっている。同様の着磁を行った解析結果の図 2-11、図 2-16(b)および図 2-17(b)と比較すると、磁束密度・区間平均変化率の値そのものに違いはあるものの、実験結果からも測定磁束密度グラフの形状を評価する各指標が得られることを確認できる。

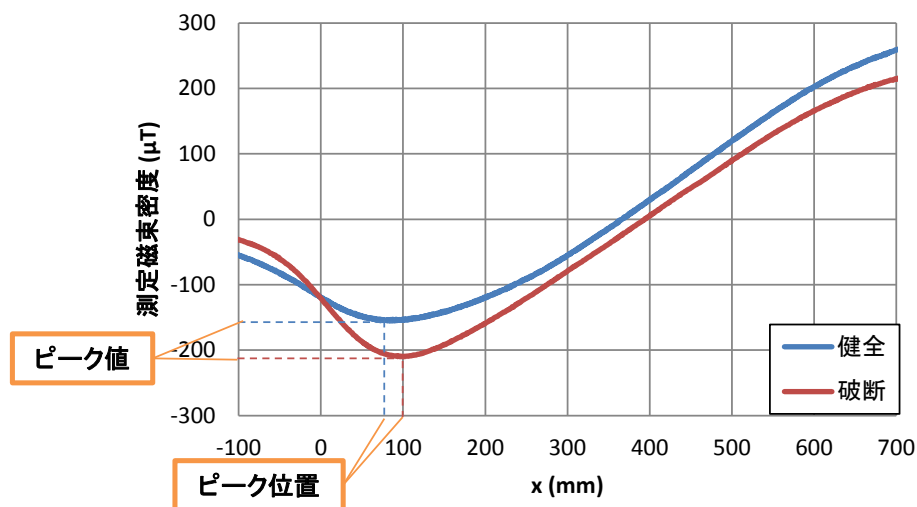


図 2-20 測定結果一例（着磁範囲：x = 0～500）

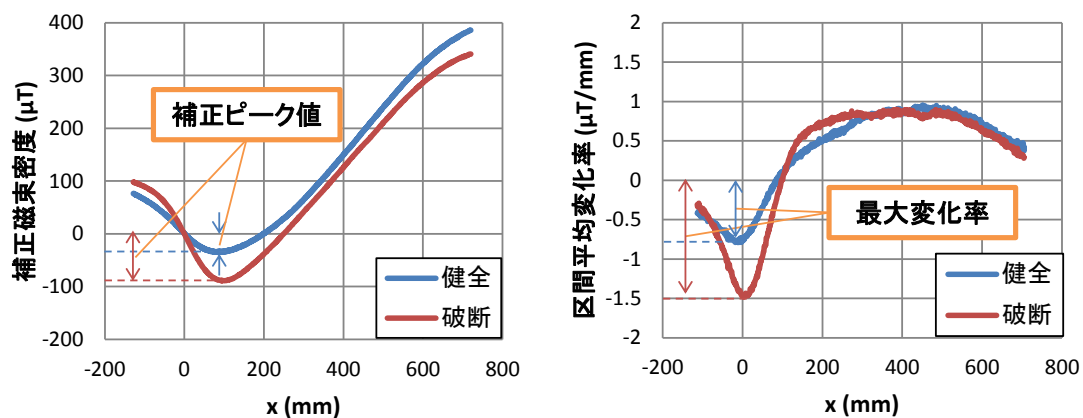


図 2-21 補正磁束密度および区間平均変化率（着磁範囲：x = 0～500）

## (2) 着磁開始位置の影響

着磁開始位置とピーク値・ピーク位置との関係を図 2-22 に、補正ピーク値・最大変化率との関係を図 2-23 に示す。ここで着磁終了位置は  $x = 500$  である。ピーク値については、破断が着磁開始位置の変化によらずほぼ一定であるのに対し、健全は着磁開始位置が大きくなるほど値が破断に近づいていく。ピーク位置は、健全・破断ともに着磁開始位置が隅角部の下方になるにつれて値が大きくなり、また、多くの場合で破断のほうが健全より値が大きいことが確認できる。補正ピーク値も着磁開始位置が大きくなるほど値が大きくなっているが、これはピーク位置の変化による影響を受けていると考えられる。最大変化率では、着磁開始位置が  $x = 100$  を超えると健全の値はほぼ一定であり、破断は減少する傾向が見られた。4つの指標に共通する傾向として、隅角部の上方から着磁を開始した場合（着磁開始位置  $x = -100, -200$ ）、値はほぼ同じであり、着磁開始位置  $x = 0$  を境目に値が変化していくという特徴が見られる。

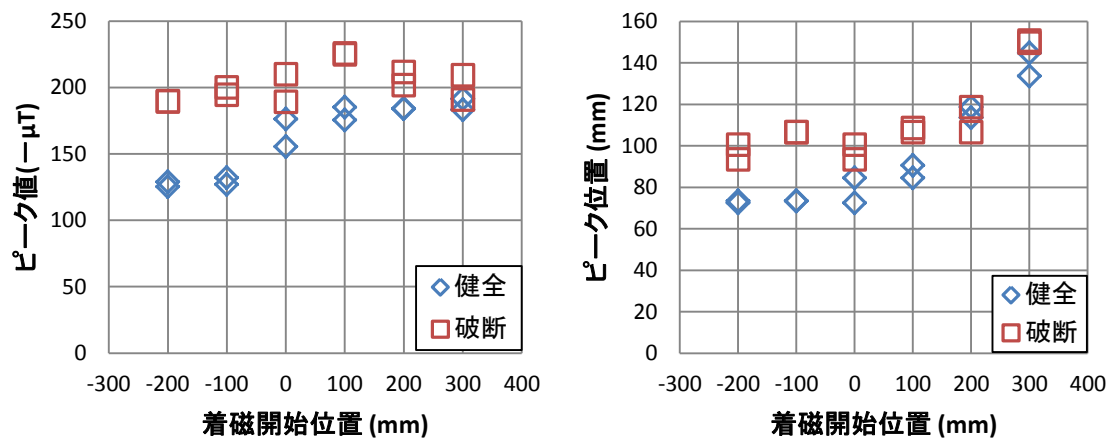


図 2-22 ピーク値・ピーク位置と着磁開始位置の関係

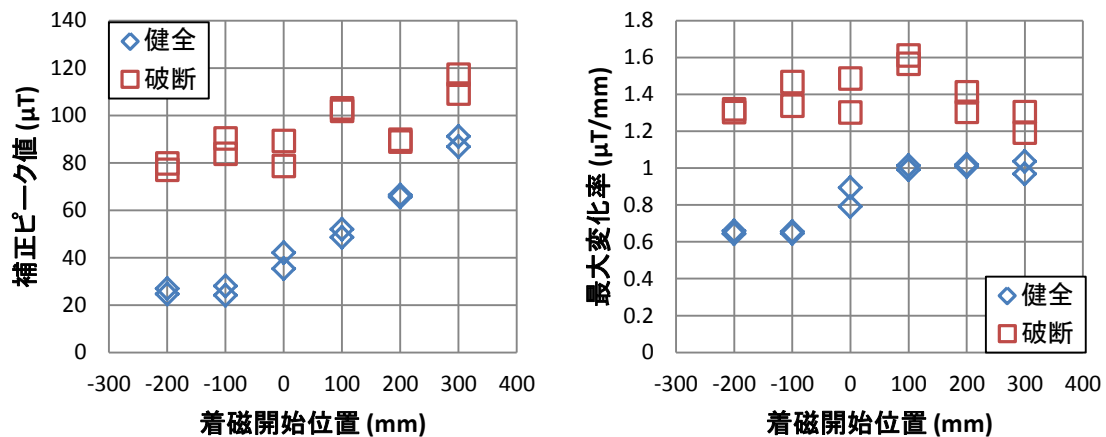


図 2-23 補正ピーク値・最大変化率と着磁開始位置の関係

### (3) 着磁終了位置の影響

着磁終了位置とピーク値・ピーク位置の関係を図 2-24 に、補正ピーク値・最大変化率の関係を図 2-25 に示す。ここで着磁開始位置は  $x = 0$  である。ピーク値、補正ピーク値、最大変化率に共通する傾向として、健全では指標の値が着磁終了位置  $x = 500$  を頂点に山なりの形となっている。破断では着磁終了位置が隅角部から離れるにつれて指標の値も一様に変化するが、着磁範囲が極端に短い着磁終了位置  $x = 200$  の場合、破断の値が健全に近づき、その差が小さくなるという特徴が見られた。ピーク位置に関しては健全・破断ともに着磁終了位置が隅角部から離れるほど値が一様に大きくなっている。

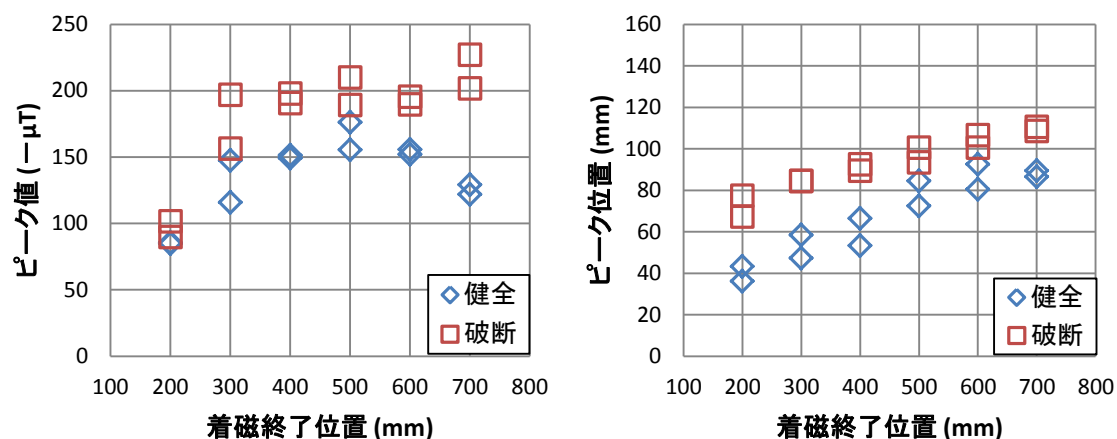


図 2-24 ピーク値・ピーク位置と着磁終了位置の関係

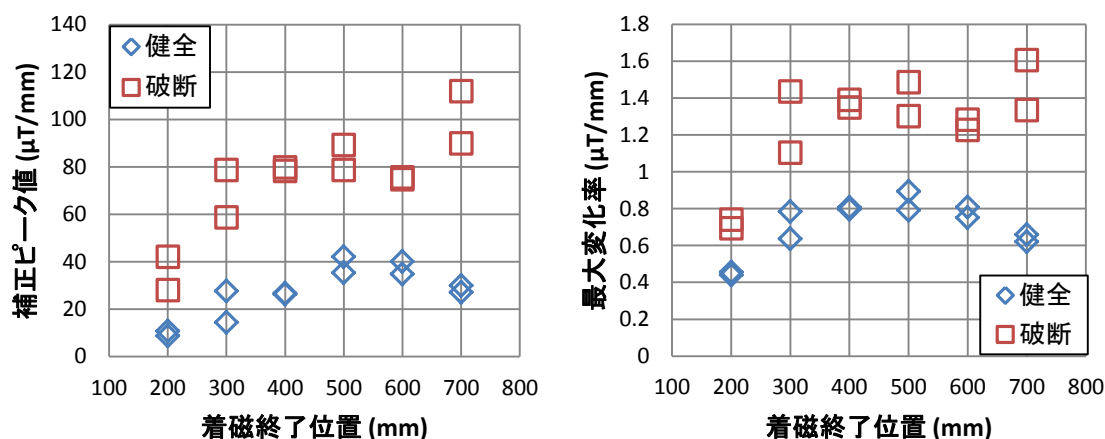


図 2-25 補正ピーク値・最大変化率と着磁終了位置の関係

### 2.2.3 着磁および測定範囲の検討

本章で想定した上部工の存在による構造上の制約（図 2-1 参照）および磁石ユニットの寸法を考慮して、着磁開始・終了位置および磁束密度の測定範囲を検討する。

まず、図 2-23 で健全と破断の指標の値に注目すると、着磁開始位置が小さいほど健全と破断の差が大きく診断が容易になることから、着磁は隅角部（ $x = 0$ ）のできるだけ上方から開始することが望ましいと言える。ただし、隅角部から上部工までのスペースを考えると常に隅角部の上方から着磁を行えるわけではない。次に、図 2-25 から着磁終了位置を 300mm 以上隅角部から離すことで健全と破断の明確な差が安定して得られることがわかるが、着磁終了位置を大きくするという事は着磁範囲の増大を意味し、診断の際により手間がかかる。

指標を得る位置に着目すると、図 2-22、図 2-24 よりピーク位置はおよそ  $x = 60 \sim 120$  である。また図 2-21 より、区間平均変化率の極小値はおよそ  $x = -50 \sim 0$  の範囲にあり、最



大変化率を得るためには隅角部より上方側の磁束密度測定結果が必要である。

以上の点を考慮し、本研究では隅角部から上部工表面までの距離が 100mm 以上であることを手法適用の条件とする。写真 2-6(a)に示した磁石ユニットの寸法を考慮して、着磁開始位置は磁石の N 面を  $x = -100$  にあわせた位置（磁石中心： $x = -10$ ），着磁終了位置は磁石の N 面が  $x = 500$  となる位置（磁石中心： $x = 590$ ）とする。また、破断診断のためには  $x = -100 \sim 200$  での範囲の磁束密度を測定することが最低限必要である。

#### 【参考文献】

- 1) R. I. Potter, R. J. Schmulian: Self-consistently computed magnetization patterns in thin magnetic recording media, IEEE Trans. Magn., 7, 873, 1971
- 2) 廣瀬誠，前田龍己，松田耕作，横田優，服部篤史，宮川豊章：磁気法による鉄筋破断非破壊検査における判定基準の構築，構造工学論文集，Vol.58A，pp.867-878，2012.3.
- 3) 国土交通省国土地理院技術資料：B・1-No.49 「磁気図 2010.0 年値」，2010.  
[http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu\\_03/magnetic\\_chart.html](http://vldb.gsi.go.jp/sokuchi/geomag/menu_03/magnetic_chart.html)
- 4) 松田耕作，廣瀬誠，前田龍己，横田優：新しい鉄筋破断非破壊診断手法の開発，コンクリートの補修，補強，アップグレード論文報告集，第 6 巻，pp.425-430，2006.10.
- 5) 土木学会：2012 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕，p.332，2012.3.



## 第3章 診断対象の影響要因およびばらつきの検討

### 3.1 実験概要

前章では片面からの着磁による破断診断の可能性を示し，その計測手法の提案を行った．本章では測定鉄筋として想定したスターラップについて様々なパラメータをとり，その影響を実験により検討する．

#### 3.1.1 パラメータ

橋脚梁部でのスターラップ隅角部での破断を想定した．実験要因を図3-1に示す．診断対象であるスターラップの鉄筋径はD16を想定し，その他にD13，D22を使用した．鉄筋の状態は前章の実験と同様に健全，破断（ギャップ：2mm）に加え，健全と破断の間の状態として曲げ加工部の内側から切れ目を入れた亀裂状態，切断後にギャップ0mmで固定した接触状態をパラメータとした．かぶりは50～150mmの範囲で変化させた．

#### 3.1.2 供試体概要

写真3-1に実験台の外観を示す．実験台の作成には木製の角材と板材，真鍮製の釘およびネジ，鉄筋固定用のケーブルタイと非磁性体の材料を使用し，厚さ25mmの角材で測定鉄筋表面から測定面までの距離（かぶり）を調節した．また，破断鉄筋については2mmの厚さの木片を挟むことで破断ギャップを再現した．使用した鉄筋は主鉄筋がSD345のD32で長さが1500mm，スターラップがSD295のD13，D16，D19，D22で長さが1800mmである．鉄筋の加工に関しては第2章2節で示した手順と同様に行い，亀裂鉄筋は写真3-2に示すように曲げ加工部の内側からバンドソー（写真2-4）を用いて径の25，50，75%の切れ目を入れた．1回の測定につき，隅角部の主鉄筋とスターラップを1本ずつ使用した．

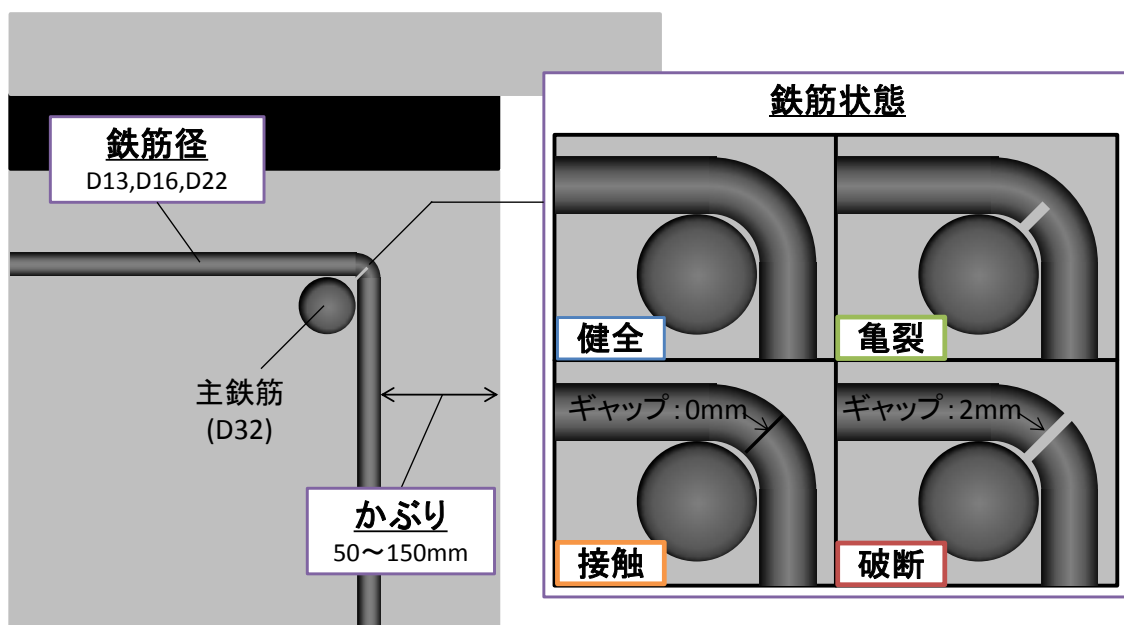


図3-1 実験要因



写真 3-1 実験台外観

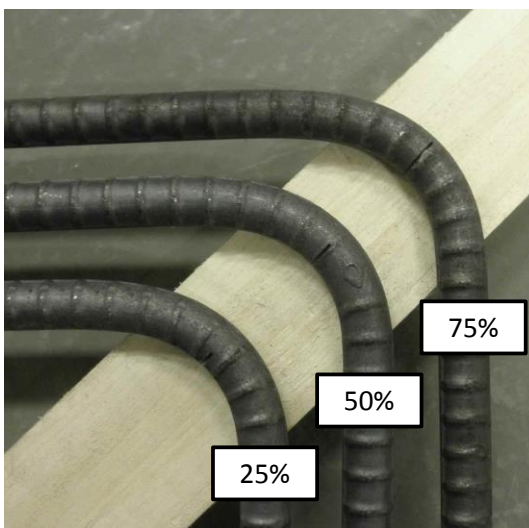


写真 3-2 亀裂鉄筋

### 3.1.3 計測方法

図 3-2 に示すように  $x-y$  座標をとり，スターラップの上面側のかぶり上縁と側面側の中心を原点とした．診断装置の磁石ユニットおよび磁気計測ユニット（写真 2-6）の動かし方を以下に示す．ここで，磁石ユニットの N 面を位置をあわせる基準面とした．

- (1) 磁石ユニットを ( $x = -100 \sim 500\text{mm}$ ,  $y = 0\text{mm}$ ) で 1.5 往復させる．
- (2) 磁石ユニットを ( $x = -100 \sim 500\text{mm}$ ,  $y = 300\text{mm}$ ) で 1.5 往復させる．
- (3) 磁気計測ユニットで ( $x = -100 \sim 500\text{mm}$ ,  $y = 0\text{mm}$ ) の磁束密度を測定する．

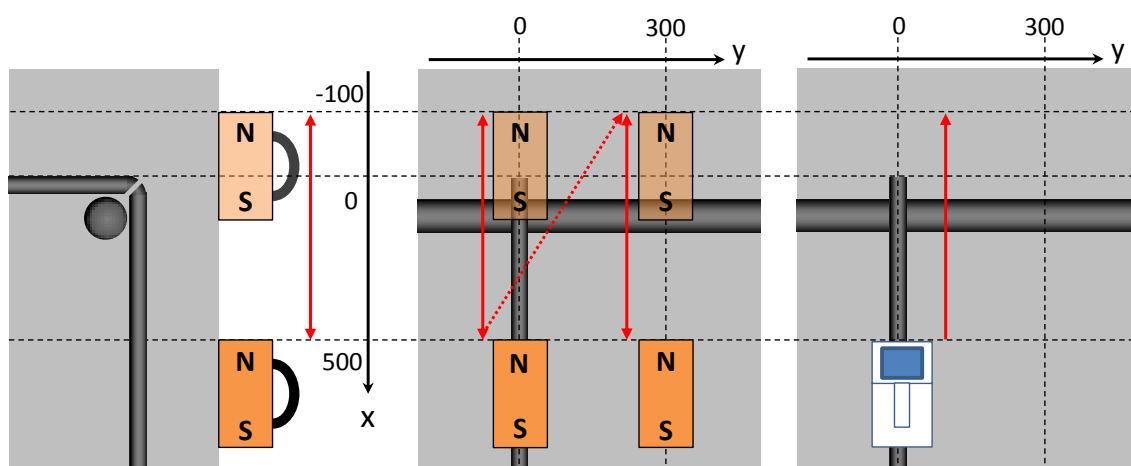


図 3-2 着磁および測定方法

### 3.1.4 診断指標

第 2 章と同様に測定磁束密度のグラフ形状を評価する方法としてピーク値, ピーク位置, 補正ピーク値, 最大変化率の 4 つの指標を用いた．

## 3.2 測定鉄筋に関する影響要因

### 3.2.1 鉄筋状態

スターラップの亀裂進展に伴う指標の変化を検討する．実験要因の一覧を表 3-1 に示す．各 5 回ずつ行った測定結果から得られたピーク値，ピーク位置，補正ピーク値，最大変化率の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 3-3，図 3-4，図 3-5，図 3-6 に示す．

表 3-1 鉄筋状態に関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D16	50,75,100 125,150	健全	各 5 回
		亀裂(25,50,75%)	
		接触(ギャップ:0mm)	
		破断(ギャップ:2mm)	

図 3-3 より，どの鉄筋状態でもかぶりが大きくなるほどピーク値の絶対値は小さくなり，得られる指標の値の減少に伴いばらつきも小さくなっている．一方，図 3-4 よりかぶりが大きくなるほどピーク位置は大きくなる傾向が見られるが，どのかぶりにおいてもばらつきが大きい指標であることが分かった．各かぶりにおいて鉄筋が完全に破断しているか否かに着目すると，健全・亀裂状態と比較して接触・破断状態の鉄筋はピーク値，ピーク位置が大きくなる傾向が見られる．亀裂状態については，亀裂の進展に伴い指標の値が健全から接触・破断に近づく傾向にあるものの，その値はほぼ健全と同程度であり，健全との差が認められるのは亀裂進展度が 75% の場合であった．

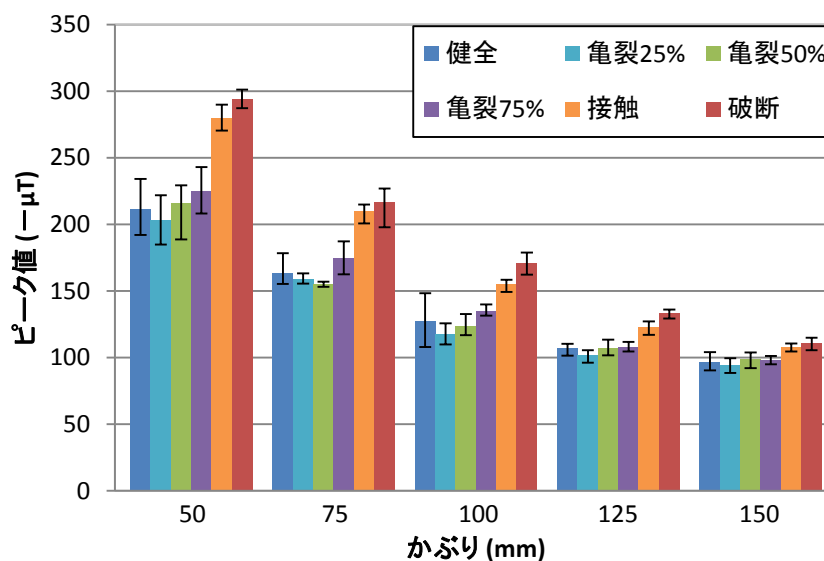


図 3-3 鉄筋状態とピーク値の関係

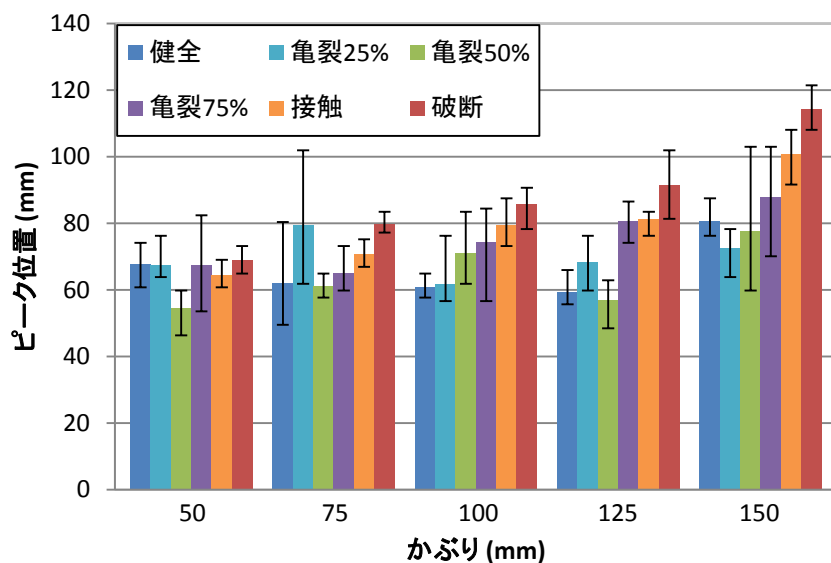


図 3-4 鉄筋状態とピーク位置の関係

図 3-5, 図 3-6 より, かぶりが大きくなるほど補正ピーク値・最大変化率の値は小さくなる。鉄筋状態に着目すると, どちらの指標も破断なし(健全・亀裂)と破断あり(接触・破断)を明確に分けており, かぶり 50~150 までの範囲の破断の診断に有効であると言える。また, 接触(ギャップ: 0mm)と比較して破断(ギャップ: 2mm)の方が健全の値と離れていることから破断ギャップが大きくなるほど診断が容易になることがわかった。亀裂状態については, 亀裂 25%, 50%では健全の値とほぼ同程度であり, かぶりによっては健全よりも値が小さくなるケースも見られた。亀裂 75%では全体的に健全よりもやや大きい値となり, 健全と接触の間となった。

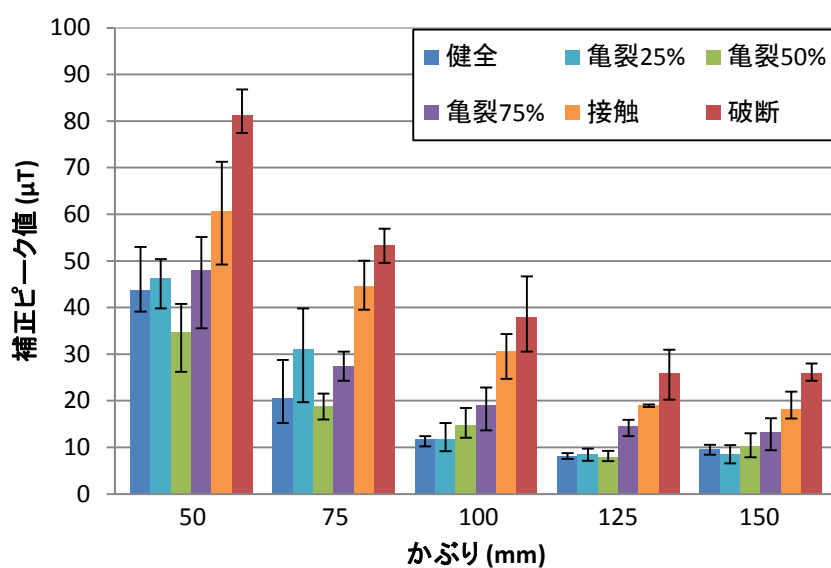


図 3-5 鉄筋状態と補正ピーク値の関係

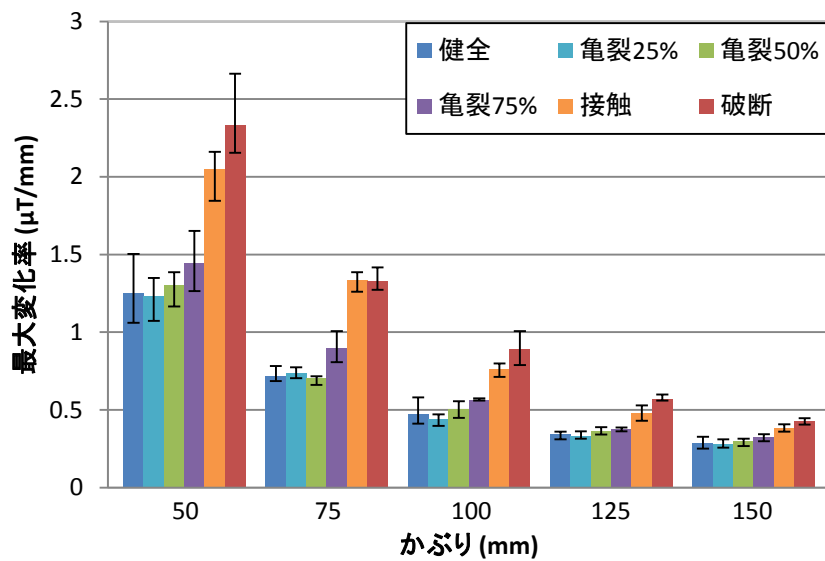


図 3-6 鉄筋状態と最大変化率の関係

### 3.2.2 かぶり

指標の値に影響を与えるかぶりについて、更に着磁を行うかぶりと測定を行うかぶりを分けてその影響を検討する。表 3-2 に実験要因の一覧を示す。基準となる着磁・測定かぶりを 100mm とし、鉄筋状態は健全および接触として各 5 回ずつ行った。測定結果から得られたピーク値、ピーク位置、補正ピーク値、最大変化率の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 3-7, 図 3-8, 図 3-9, 図 3-10 に示す。

表 3-2 かぶりに関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)		鉄筋状態	実験数
	着磁	測定		
D16	50	100	健全 接触(ギャップ:0mm)	各 5 回
	75			
	125			
	150			
	100	50		
		75		
		125		
		150		

図 3-7 より、健全・接触ともに着磁かぶりが変化してもピーク値はほとんど変化しないことから、測定鉄筋は十分に帯磁されており、かぶり 50～150mm の範囲では同様の帯磁状態での磁束密度測定ができると考えられる。一方、測定かぶりが大きくなるほどピーク値の絶対値は小さくなることから、かぶりの増大に伴いグラフが平坦になる原因はこの測定かぶりであると考えられる。図 3-8 より、ピーク位置は着磁かぶりが大きくなるほど小さく、測定かぶりが大きくなるほど大きくなるという傾向が見られた。

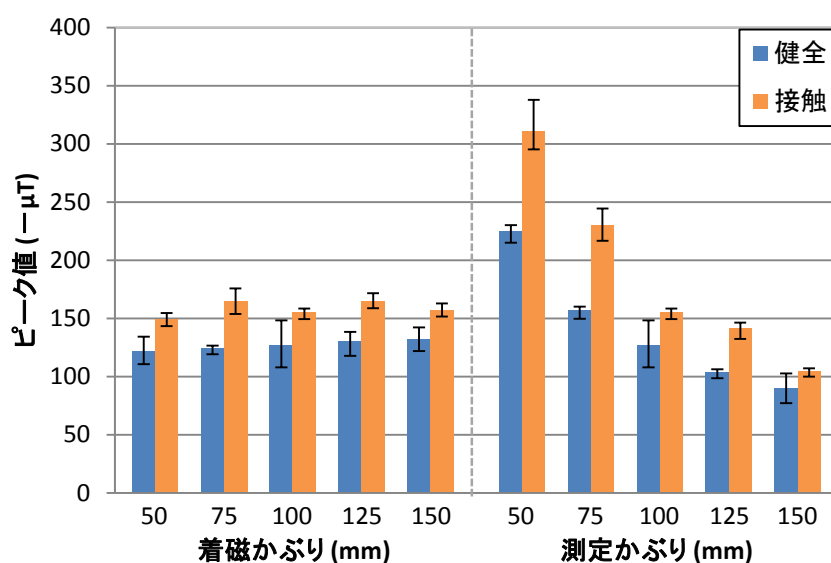


図 3-7 着磁・測定かぶりとピーク値の関係

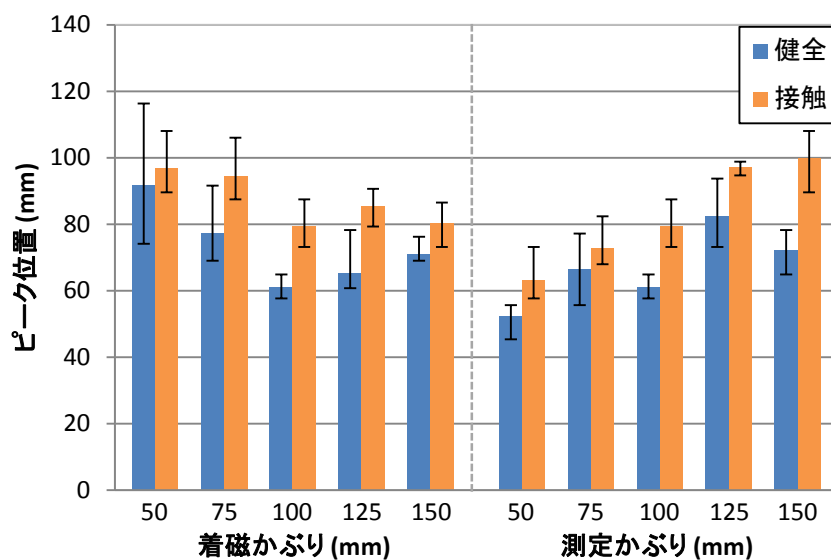


図 3-8 着磁・測定かぶりとピーク位置の関係

図 3-9 より、測定かぶりが大きくなるほど補正ピーク値は小さくなっている。一方、着磁かぶりの影響については図 3-8 に示したピーク位置の変化と対応するように変動しており、一様な傾向は見られない。影響の度合いについては測定かぶりが支配的であり、着磁かぶりによる補正ピーク値への影響は比較的小さいと考えられる。

最大変化率についても着磁かぶりによる影響はほとんどなく、測定かぶりにより影響を受ける指標であることがわかる。2 つの指標を比較すると、補正ピーク値は測定かぶりが 150mm と大きい場合でも破断の有無による明確な差が見られる。これはピーク位置の増大により、隅角部での測定磁束密度とピーク値の差が大きく表れたためと考えられる。一方、最大変化率はかぶりが 50mm と小さい場合でもばらつきが比較的小さく、高い精度での診断が可能であると予想される。

以上より、2 つの診断指標はかぶり 50～150mm の範囲では着磁を行うかぶりの影響はほとんどないが、磁束密度を測定するかぶりにより指標の値が変動するため、その値を用いて鉄筋状態を推定するためには測定する鉄筋のかぶりに関する情報が必要である。

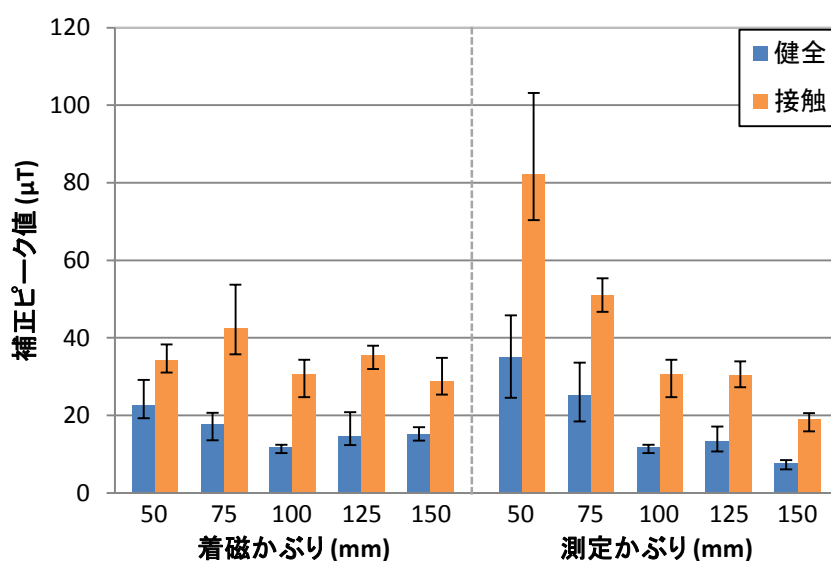


図 3-9 着磁・測定かぶりと補正ピーク値の関係

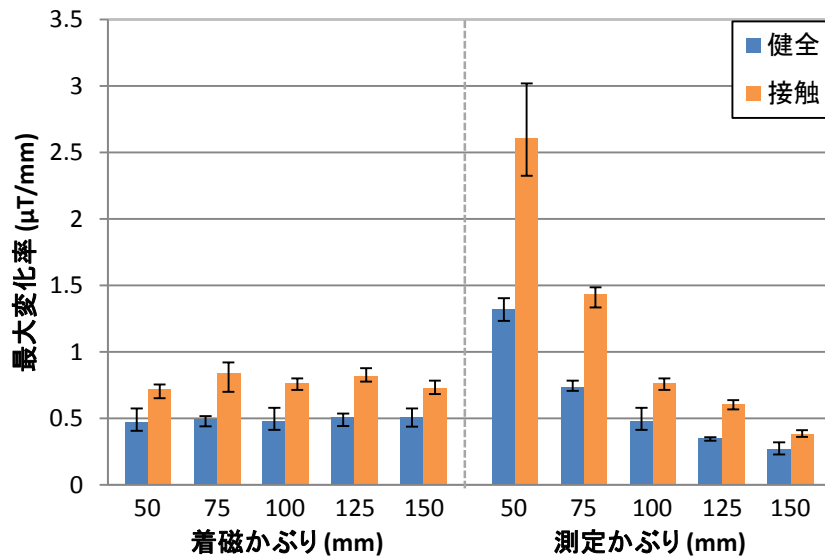


図 3-10 着磁・測定かぶりと最大変化率の関係

### 3.2.3 鉄筋径

スターラップの鉄筋径の変化による指標への影響を検討する．表 3-3 に実験要因一覧を示す．ここで鉄筋状態は健全・接触とし，各 5 回ずつ行った．測定結果から得られたピーク値，ピーク位置，補正ピーク値，最大変化率の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 3-11，図 3-12，図 3-13，図 3-14 に示す．

表 3-3 鉄筋径に関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D13	50,75,100 125,150	健全 接触(ギャップ:0mm)	各 5 回
D16			
D22			

図 3-11 より，各かぶりにおいて鉄筋径が太くなるほどピーク値が一様に大きくなる．鉄筋の体積が大きくなることで帯磁量も増え，結果としてグラフの形状が急になると考えられる．また D22 に関しては健全の値が特に大きく，接触との差が他の鉄筋径に比べて小さくなるという特徴が見られた．図 3-12 より，D13 のピーク位置は D16，D22 と比較して全体的に大きくなっている．



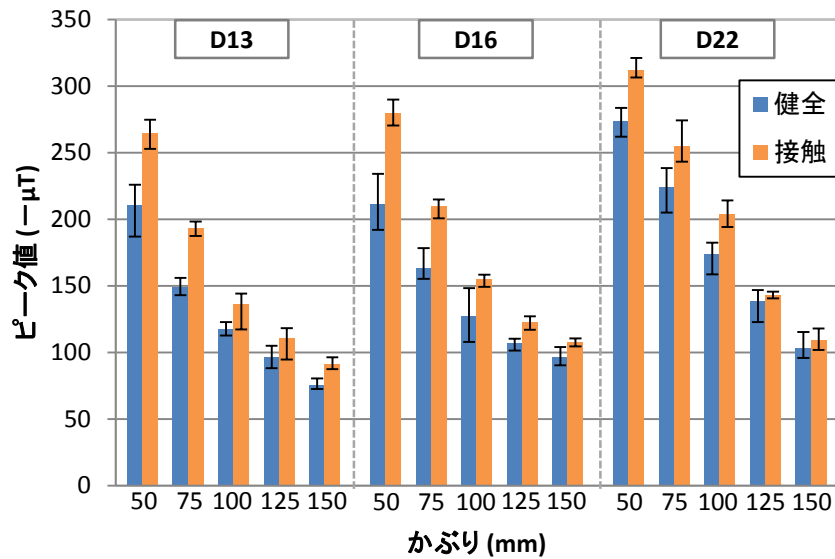


図 3-11 鉄筋径とピーク値の関係

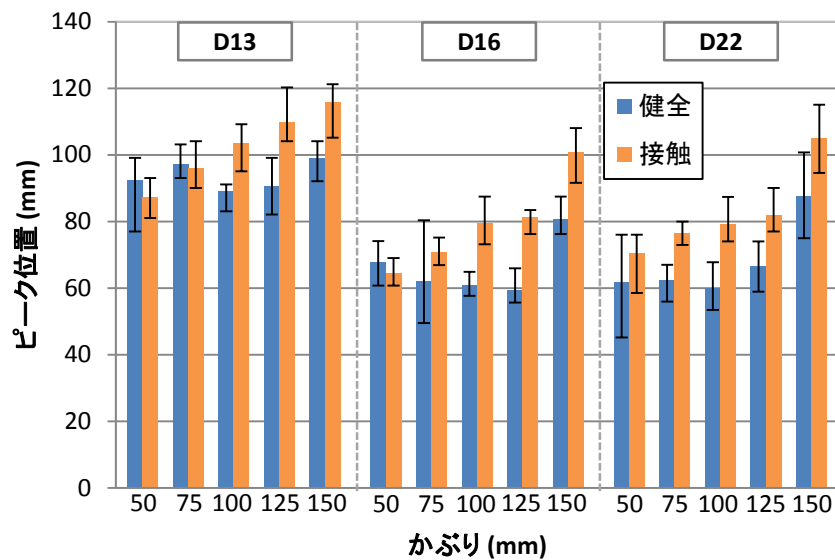


図 3-12 鉄筋径とピーク位置の関係

図 3-13 より，D16 の補正ピーク値は D13，D22 よりも小さくなっている．これは，上記のように D22 についてはグラフの傾き，D13 についてはピーク位置が影響を与えたものと考えられる．どの鉄筋径でも健全と接触の差は見られるため，破断の有無の判断は可能であるが，その値は鉄筋径毎に設定する必要があると考えられる．図 3-14 より，最大変化率については鉄筋径が太くなるほど値が大きくなる傾向が見られる．これは最大変化率が補正ピーク値とは違いピーク位置による影響を受けない指標であるためと考えられる．

以上より，2 つの診断指標は測定する鉄筋の径により値が変動するため，鉄筋状態を推定するためには鉄筋径に関する情報が必要である．

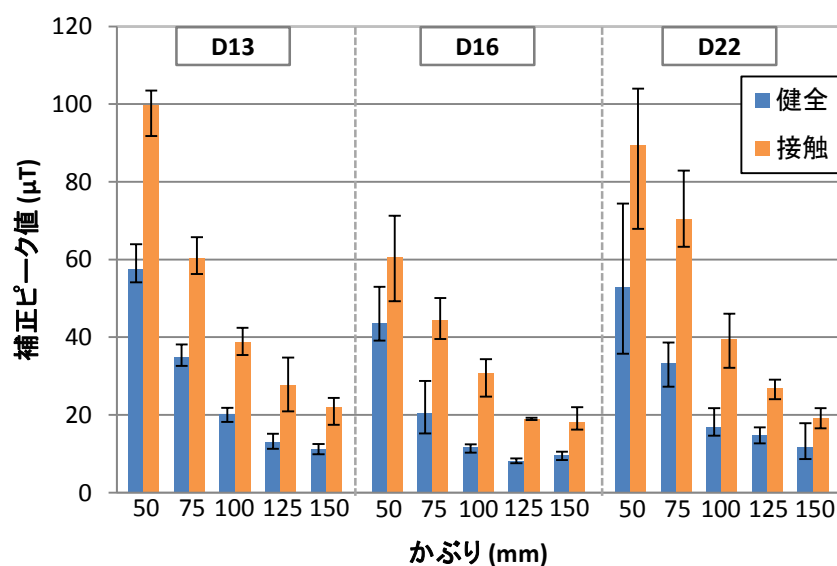


図 3-13 鉄筋径と補正ピーク値の関係

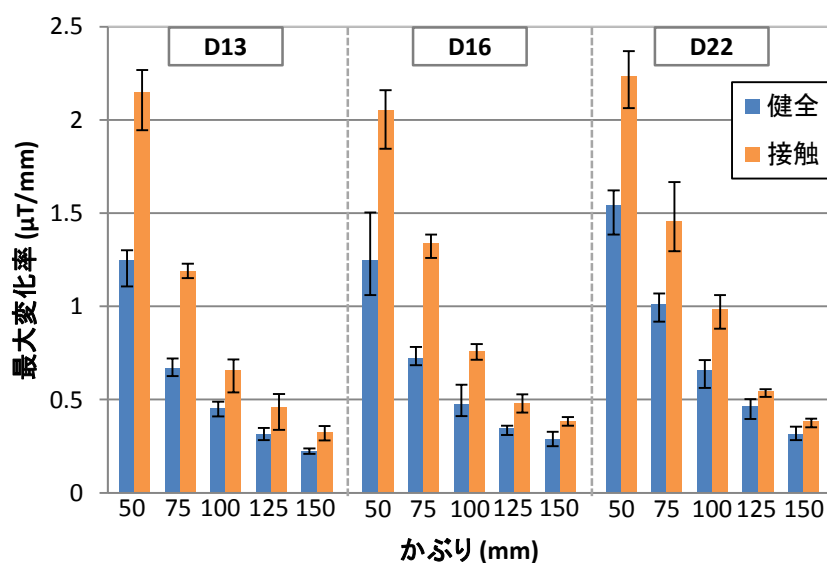


図 3-14 鉄筋径と最大変化率の関係

### 3.3 ばらつきを考慮した判断基準の作成

前節では測定鉄筋に関する要因による測定結果の変化の傾向を調べた。本節では診断指標である補正ピーク値および最大変化率のばらつきについて検討を行うとともに、ばらつきの分布を考慮した鉄筋状態の判定境界の設定方法について検討する。

#### 3.3.1 診断指標のヒストグラム

表 3-4 に実験要因の一覧を示す。かぶりは図 3-5、図 3-6 でばらつきの大きかった 50mm とした。測定結果から得られた診断指標の最小値、最大値、平均値を表 3-5 に、補正ピーク値および最大変化率のヒストグラムをそれぞれ図 3-15、図 3-16 に示す。データ数が各鉄筋

状態につき 30 個であることと、表 3-5 に示した最小値と最大値の差を考慮し、ヒストグラムは全鉄筋状態を通して 6 程度ずつ区間を持たせるよう診断指標ごとに設定した<sup>1)</sup>。

表 3-4 ばらつきに関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D16	50	健全 亀裂(50%) 接触(ギャップ:0mm) 破断(ギャップ:2mm)	各 30 回

表 3-5 測定結果の最小値，最大値，平均値

診断指標	鉄筋状態	最小値	最大値	平均値
補正ピーク値 ( $\mu T$ )	健全	33.0	53.0	42.0
	亀裂	26.2	56.0	40.1
	接触	48.1	98.9	65.5
	破断	64.6	102.7	80.0
最大変化率 ( $\mu T/mm$ )	健全	1.06	1.50	1.26
	亀裂	1.17	1.50	1.33
	接触	1.73	2.44	2.05
	破断	2.04	2.86	2.46

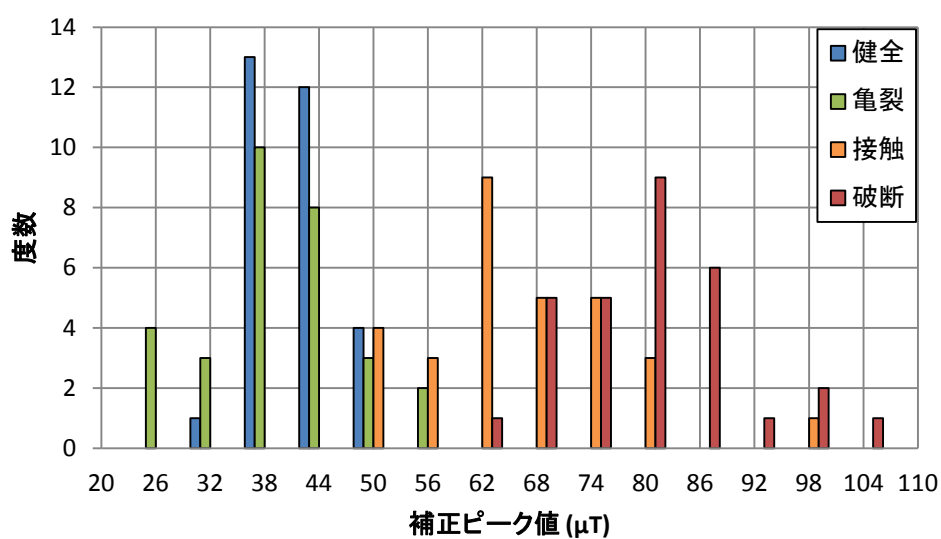


図 3-15 かぶり 50mm での補正ピーク値のヒストグラム

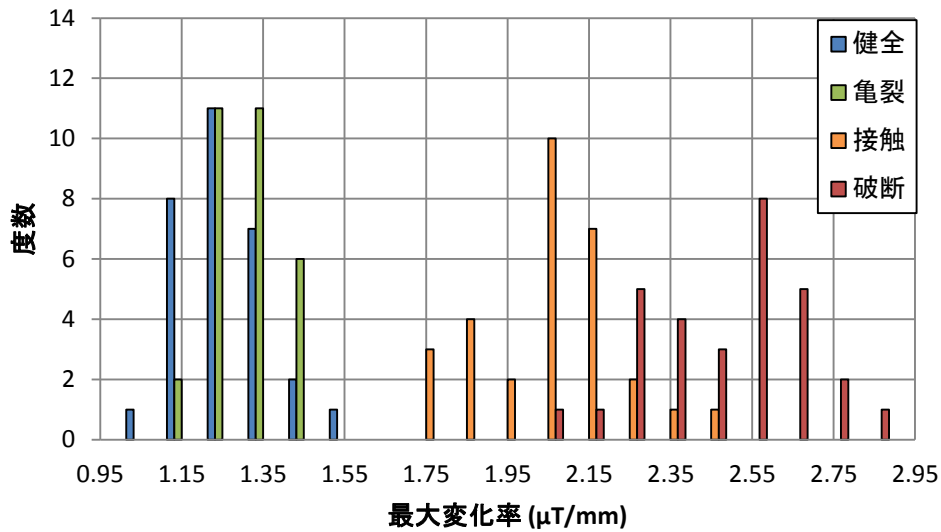


図 3-16 かぶり 50mm での最大変化率のヒストグラム

図 3-15 より，補正ピーク値では健全と破断の分布が明確に分かれている．接触状態も概ね分かれていると言えるが，補正ピーク値 47～53μT の区間で測定結果の一部が混同している．亀裂状態については健全との分布に差がほとんど見られず，亀裂進展度 50%の状態を検知することは難しいと考えられる．

図 3-16 より，最大変化率ではギャップ 0mm の接触も含めて健全と破断の分布を明確に分けており，かぶり 50mm については補正ピーク値よりも診断の精度が高いと考えられる．しかし，亀裂状態については補正ピーク値と同様に健全状態との分離は難しいという結果となった．

### 3.3.2 ばらつきの分布の検定

図 3-15，図 3-16 のヒストグラム形状より，診断指標のばらつきを正規分布か対数正規分布で表現できることが予想される．そこで仮定した確率分布と元データとの適合度を検定する．この適合度検定にはカイ二乗検定とコルモゴロフ=スミルノフ検定があるが，ここではすべてのサンプル値を用いているなどの諸点で優れる後者の検定を行うものとする．

コルモゴロフ=スミルノフ検定は累積分布関数を 1 つまたは 2 つのサンプルから定める検定であり，ここでは 1 サンプルの検定を行う．図 3-15，図 3-16 の各鉄筋状態における 30 回のデータを値が小さい順に並べ替えたサンプル  $x_1, x_2, \dots, x_{30}$  を用いて式(3.1)で表される経験累積分布関数と仮定する累積分布関数を比較する<sup>2)</sup>．

$$F_n(x) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i(x) \quad (3.1)$$

ここに，

$$X_i(x) = 1 \quad (x_i \leq x), \quad 0 \quad (x_i > x) \quad (3.2)$$

診断指標の値のばらつきの分布として正規分布，対数正規分布を仮定した．正規分布，対数正規分布の確率密度関数はそれぞれ式(3.3)，式(3.4)で表される．

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right] \quad (-\infty < x < \infty) \quad (3.3)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}x\zeta} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (x > 0), \quad 0 \quad (x \leq 0) \quad (3.4)$$

ここに，

$$\lambda = \ln \mu - \frac{\zeta^2}{2} \quad (3.5)$$

$$\zeta^2 = \ln\left\{1 + \left(\frac{\sigma}{\mu}\right)^2\right\} \quad (3.6)$$

$\mu$  : 診断指標の平均値

$\sigma$  : 診断指標の標準偏差

このとき，

$$D = \max_i \left| F_n(x_i) - \int_{-\infty}^{x_i} f(x) dx \right| \quad (3.7)$$

で表される最大偏差統計量が有意水準の境界値よりも大きければ「有意差あり」と判定され，帰無仮説は棄却される．図 3-15，図 3-16 のデータから得られる最大偏差統計量を表 3-6 に示す．有意水準としては 5% または 1% がよく用いられているが，ここで  $n=30$  の 5% の棄却限界値と比較すると，正規分布，対数正規分布どちらを仮定した場合でも最大偏差統計量は小さくなっていることから，帰無仮説は棄却されず，正規分布，対数正規分布のどちらも診断指標のばらつきを概ね評価できていることがわかる．

表 3-6 コルモゴロフ=スミルノフの適合度検定による最大偏差統計量

	診断指標	鉄筋状態				有意水準 5% 棄却限界値
		健全	亀裂	接触	破断	
正規分布	補正ピーク値	0.1090	0.0791	0.1279	0.0949	0.2417
	最大変化率	0.0711	0.0737	0.1016	0.0949	
対数正規	補正ピーク値	0.0896	0.0851	0.0958	0.0731	
	最大変化率	0.0603	0.0639	0.0978	0.1075	

### 3.3.3 破断の有無の判断基準の設定方法

鉄筋の亀裂状態の評価が難しいこと、破断ギャップが大きくなるほど診断指標の値が健全から離れる傾向にあることから、健全と接触（ギャップ：0mm）の結果を用いて破断の有無の判断基準の検討を行う。表 3-4 の結果に加え、健全と接触状態についてかぶり 75, 100, 125, 150mm での実験を各 30 回行った。実験要因一覧を表 3-7 に示す。

表 3-7 判断基準に関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D16	50,75,100 125,150	健全 接触(ギャップ:0mm)	各 30 回

ここで、図 3-17 に示すように 2 つの正規分布  $N(\mu, \sigma^2)$  と  $N'(\mu', \sigma'^2)$  の境界を設定するにあたり、安全性指標  $\beta$  を用いた信頼性設計法の考え方を参考にした<sup>3)</sup>。性能関数  $Z$  を  $Z = N' - N$  と定義すると、安全性指標  $\beta$  は式(3.9)で定義される。

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu' - \mu}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma'^2}} \quad (3.9)$$

この安全性指標  $\beta$  の値が大きいほど  $Z \leq 0$  となる確率が小さくなる。設計における許容安全性指標を  $\beta_a$  とすれば、式(3.10)に示す条件を満足することが要求される。

$$\beta \geq \beta_a \quad (3.10)$$

式(3.10)に式(3.9)を代入して整理すると、式(3.11)が得られる。

$$\mu' - \beta_a \frac{\sigma'^2}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma'^2}} \geq \mu + \beta_a \frac{\sigma^2}{\sqrt{\sigma^2 + \sigma'^2}} \quad (3.11)$$

ここで、式(3.10)がイコールをとるとき、その値  $x$  を境界と設定すると、式(3.9)、式(3.11)より  $x$  は式(3.12)で表される。

$$x = \mu + \frac{\sigma^2}{\sigma^2 + \sigma'^2} (\mu' - \mu) = \frac{\mu\sigma'^2 + \mu'\sigma^2}{\sigma^2 + \sigma'^2} \quad (3.12)$$

かぶりごとに健全と接触の 2 つの分布を考慮し、正規分布を仮定した安全性指標と境界値をそれぞれ式(3.5)と式(3.6)に、対数正規分布を仮定した安全性指標と境界値をそれぞれ式(3.7)と式(3.8)に示す。

$$\beta(ND) = \frac{\mu_r - \mu_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma_r^2}} \quad (3.5)$$

$$B(ND) = \frac{\sigma_i^2 \mu_r + \sigma_r^2 \mu_i}{\sigma_i^2 + \sigma_r^2} \quad (3.6)$$

$$\beta(LND) = \frac{\lambda_r - \lambda_i}{\sqrt{\zeta_i^2 + \zeta_r^2}} \quad (3.7)$$

$$B(LND) = \exp \left[ \frac{\zeta_i^2 \lambda_r + \zeta_r^2 \lambda_i}{\zeta_i^2 + \zeta_r^2} \right] \quad (3.8)$$

ここに、

$\mu_i$  : 健全の診断指標の平均値

$\sigma_i$  : 健全の診断指標の標準偏差

$\mu_r$  : 接触の診断指標の平均値

$\sigma_r$  : 接触の診断指標の標準偏差

$\lambda_i$  : 健全の診断指標の対数平均値

$\zeta_i$  : 健全の診断指標の対数標準偏差

$\lambda_r$  : 接触の診断指標の対数平均値

$\zeta_r$  : 接触の診断指標の対数標準偏差

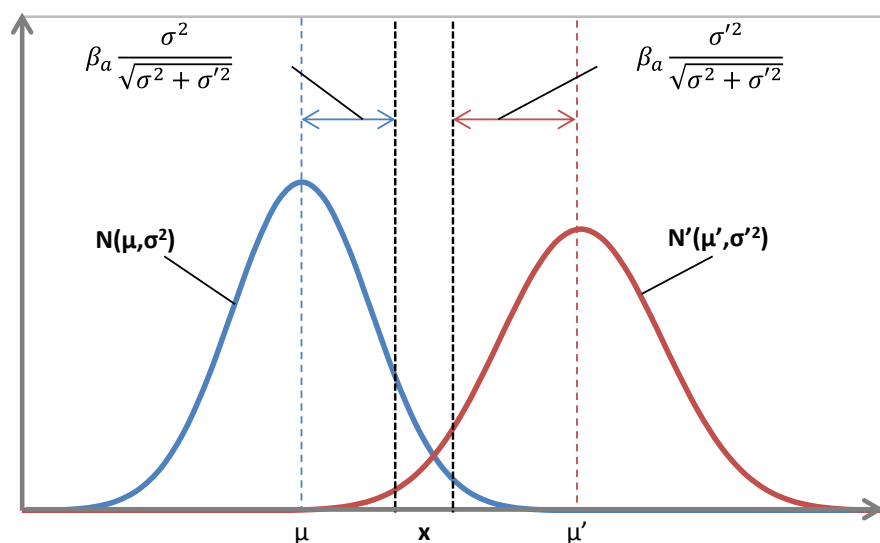


図 3-17 2つの正規分布の境界の設定

表 3-8 に仮定した分布ごとの安全性指標と判断基準の値を示す。表 3-8 より，正規分布より対数正規分布を仮定したほうが補正ピーク値，最大変化率どちらの診断指標でも安全性指標が大きくなっており，判定が容易になることがわかる。対数正規分布を仮定すると，かぶりが 150mm と大きい場合では補正ピーク値，かぶりが 50mm と小さい場合では最大変化率の安全性指標が大きくなっており，どちらの診断指標でもかぶり 50～150mm で誤判定確率が 2.275%となる安全性指標の値 2 を上回っている。

表 3-8 仮定した分布ごとの安全性指標および判断基準値

		仮定した 分布	かぶり(mm)				
			50	75	100	125	150
補正ピーク値	安全性指標	正規分布	1.97	3.49	3.97	3.85	3.88
		対数正規	2.21	3.86	4.19	4.73	4.55
	判断基準 ( $\mu T$ )	正規分布	45.6	26.8	17.0	9.70	10.8
		対数正規	47.8	33.9	21.6	12.9	12.9
最大変化率	安全性指標	正規分布	3.97	4.01	3.95	2.96	3.44
		対数正規	4.17	4.61	4.17	3.41	3.51
	判断基準 ( $\mu T/mm$ )	正規分布	1.48	0.81	0.56	0.36	0.32
		対数正規	1.59	0.86	0.61	0.37	0.34



測定結果から得られた補正ピーク値と健全・接触の判断基準を図 3-18 に、最大変化率と健全・接触の判断基準を図 3-19 に示す。ここで判断基準は表 3-8 の対数正規分布を仮定した値を用いた。各かぶりにおいて境界値よりも値が小さければ「破断なし」、大きければ「破断あり」と判断できる。図 3-18, 図 3-19 より、健全で境界値を上回る回数と、接触で境界値を下回る回数を表 3-8 に示す。接触鉄筋はどちらの診断指標でも各かぶりにおいてすべて正しく判定ができています。健全鉄筋については、かぶり 50mm の補正ピーク値の 3 回以外は全て鉄筋状態を正しく評価できた。以上より、ばらつきを対数正規分布で評価した判断基準を用いることでかぶり 50～150mm の範囲で破断の有無を診断できると考えられる。

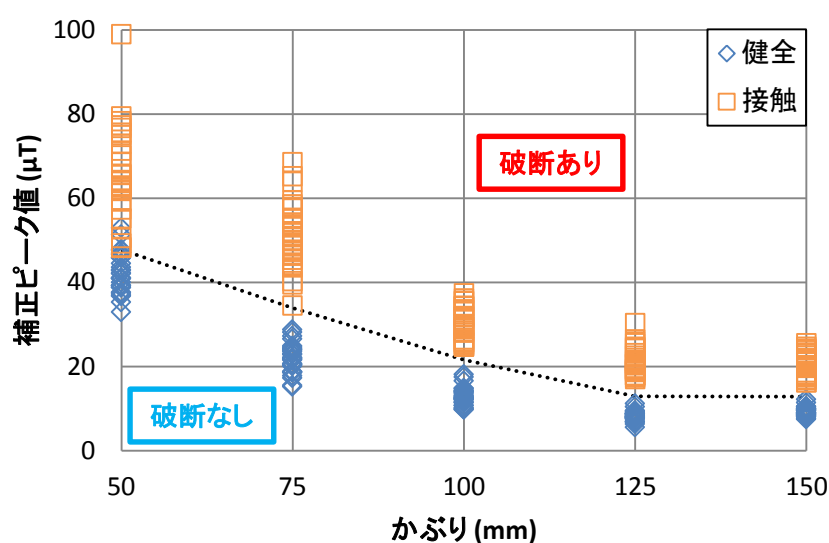


図 3-18 補正ピーク値による破断の有無の判断基準

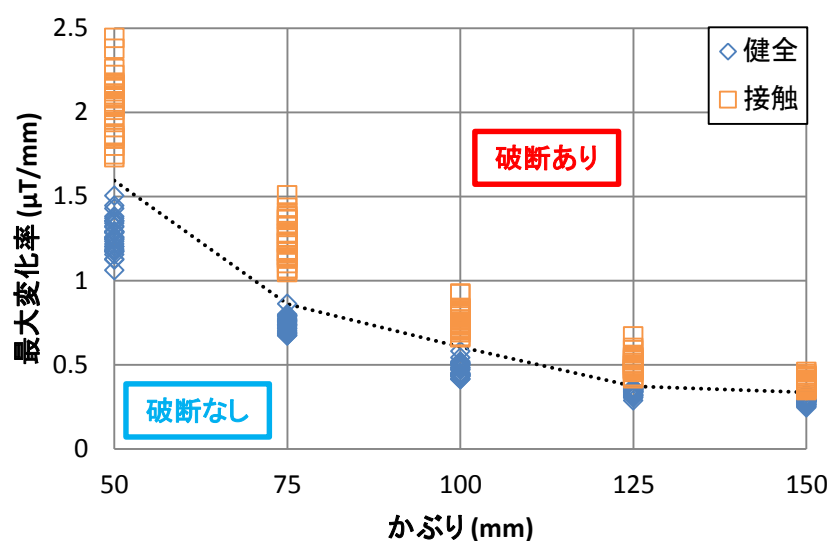


図 3-19 最大変化率による破断の有無の判断基準

表 3-8 診断指標ごとの誤診断数

診断指標	鉄筋状態	かぶり(mm)					誤診断数
		50	75	100	125	150	
補正ピーク値	健全	3/30	0/30	0/30	0/30	0/30	3/150
	接触	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/150
最大変化率	健全	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/150
	接触	0/30	0/30	0/30	0/30	0/30	0/150

【参考文献】

- 1) 永田靖：入門 統計解析法，日科技連，pp.9-10，1992.4.
- 2) 松原望：入門 統計解析－医学・自然科学編－，東京図書，pp.299-301，2007.10.
- 3) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，pp.59-62，1986.5.

## 第4章 現場を想定した診断可能性の検討

### 4.1 配筋ピッチの影響

実際の構造物では、棒部材の全長にわたり 0.15%以上のスターラップが配置されている。その配置間隔は原則として部材有効高さの 3/4 倍以下かつ 400mm 以下とし、計算上せん断補強鋼材が必要な場合は部材有効高さの 1/2 倍以下かつ 300mm 以下とされており<sup>1)</sup>、周囲のスターラップの存在により磁束密度測定結果が影響を受けることが予想される。本節ではスターラップを複数本配置し、配筋ピッチによる測定結果の影響について検討する。

#### 4.1.1 実験概要

使用した鉄筋は隅角部の主鉄筋が SD345 の D32 で長さが 1500mm、スターラップが SD295 の D16 で長さが 1800mm である。実験台および鉄筋の加工については第3章と同様である。図 4-1 に示すように  $y = -300 \sim 300\text{mm}$  の区間にスターラップをピッチ 100 $\sim$ 300mm で複数本配置した。 $y = 0\text{mm}$  に配置したスターラップを測定鉄筋とし、鉄筋状態を健全および接触（ギャップ：0mm）とした。その他のスターラップの鉄筋状態は健全である。診断装置は第2章、第3章と同じ磁石ユニットおよび磁気計測ユニット（写真 2-6）を使用した。着磁方法は磁石ユニットを用いて（ $x = -100 \sim 500\text{mm}$ ）の範囲をスターラップ直上で順に 1.5 往復した後、測定鉄筋から 300mm 離れた位置（ $y = 300\text{mm}$ ）で 1.5 往復した。ここで着磁を行うかぶりは 100mm とした。着磁終了後、磁気計測ユニットを用いて測定鉄筋直上（ $y = 0\text{mm}$ ）の測定面に垂直な方向の磁束密度をかぶり 50, 75, 100, 125, 150 の 5 箇所（ $x = -150 \sim 700\text{mm}$ ）の範囲を計測した。表 4-1 に実験要因一覧を示す。ケース 1-1 $\sim$ 1-3 は測定鉄筋の両隣に 1 本ずつ、ケース 2-1 およびケース 2-2 は  $y = -300 \sim 300\text{mm}$  の区間全域にスターラップを配置した。実験数は各要因について 5 回ずつ行った。

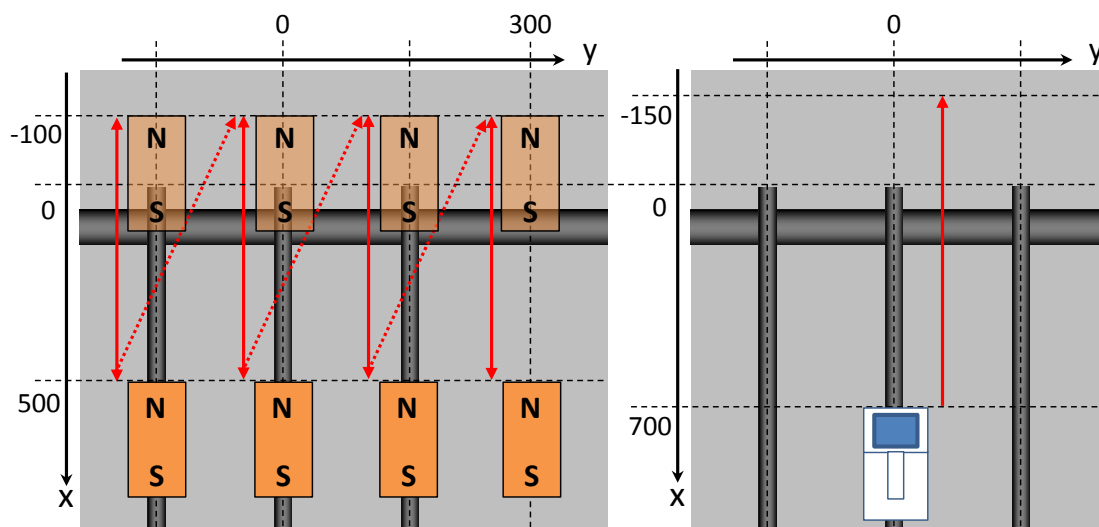


図 4-1 着磁および測定方法

表 4-1 ピッチに関する実験要因一覧

	ピッチ (mm)	スターラップ配置 (mm)	着磁位置 (mm)	測定かぶり (mm)	測定鉄筋状態	実験数
ケース 1-1	100	y=-100,0,100	y=-100,0,100,300	50,75,100, 125,150	健全,接触	各 5 回
ケース 1-2	200	y=-200,0,200	y=-200,0,200,300			
ケース 1-3	300	y=-300,0,300	y=-300,0,300			
ケース 2-1	100	y=-300,-200,-100, 0,100,200,300	y=-300,-200,-100, 0,100,200,300			
ケース 2-2	150	y=-300,-150, 0,150,300	y=-300,-150, 0,150,300			

#### 4.1.2 実験結果

##### (1) 両隣のスターラップの影響

測定結果から得られた磁束密度のグラフを評価する方法については第 2 章，第 3 章と同様にピーク値，ピーク位置，補正ピーク値，最大変化率を指標として用いた．ケース 1-1，1-2，1-3 で得られたピーク値，ピーク位置，補正ピーク値，最大変化率の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 4-2，図 4-3，図 4-4，図 4-5 に示す．

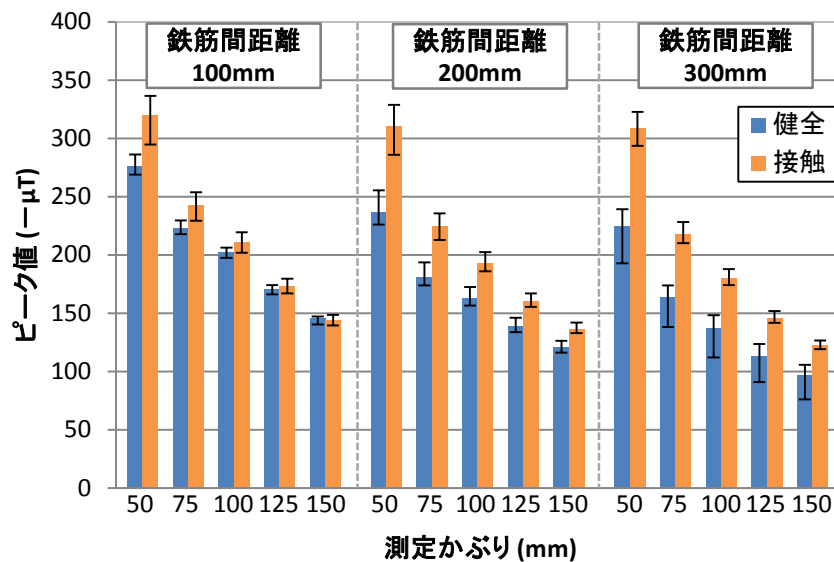


図 4-2 両隣のスターラップとの距離とピーク値の関係

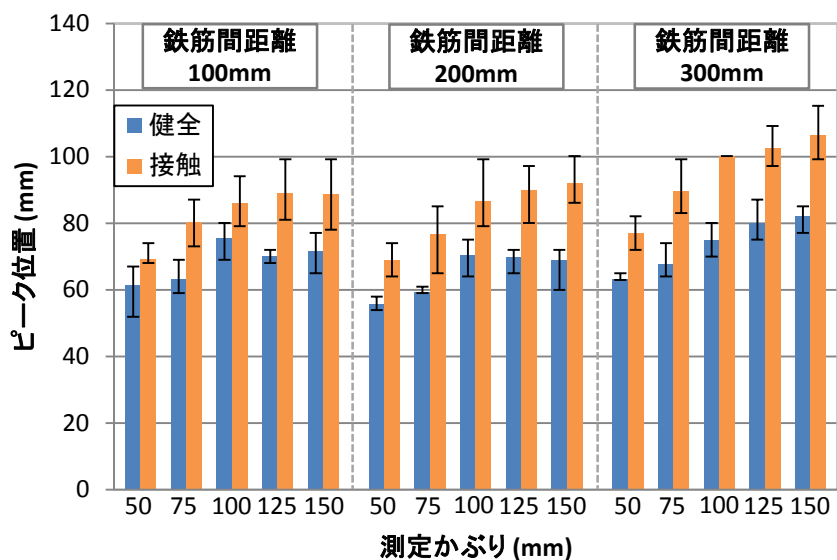


図 4-3 両隣のスターラップとの距離とピーク位置の関係

図 4-2 より，スターラップ間の距離が小さくなるほど健全，接触どちらもピーク値が大きくなった．また，健全の方がピーク値の増大が顕著であり，結果として健全と接触の差が小さくなった．

図 4-3 より，両隣のスターラップとの距離が小さくなるほど健全，接触どちらも小さくなる傾向が見られるが，接触の方がこの現象の傾向がより顕著であり，結果として鉄筋間距離が小さくなることで健全と接触のピーク位置の差も小さくなった．

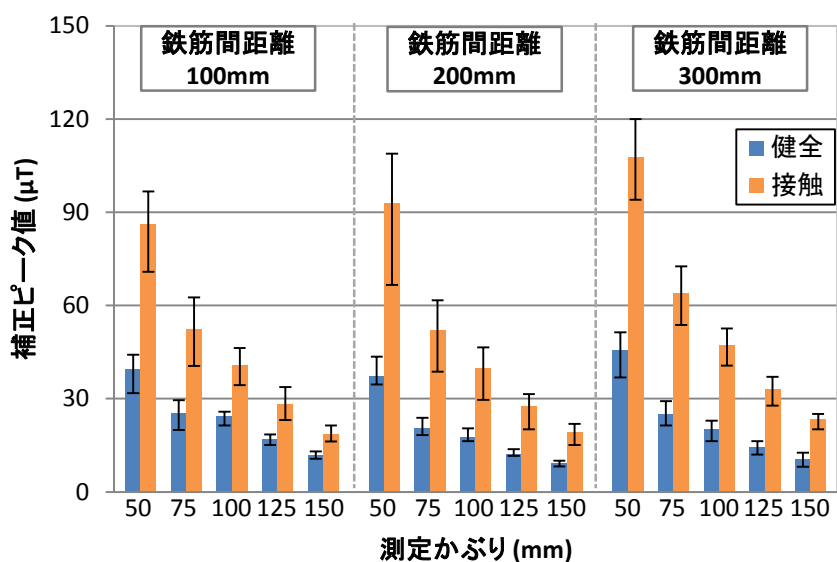


図 4-4 両隣のスターラップとの距離と補正ピーク値の関係

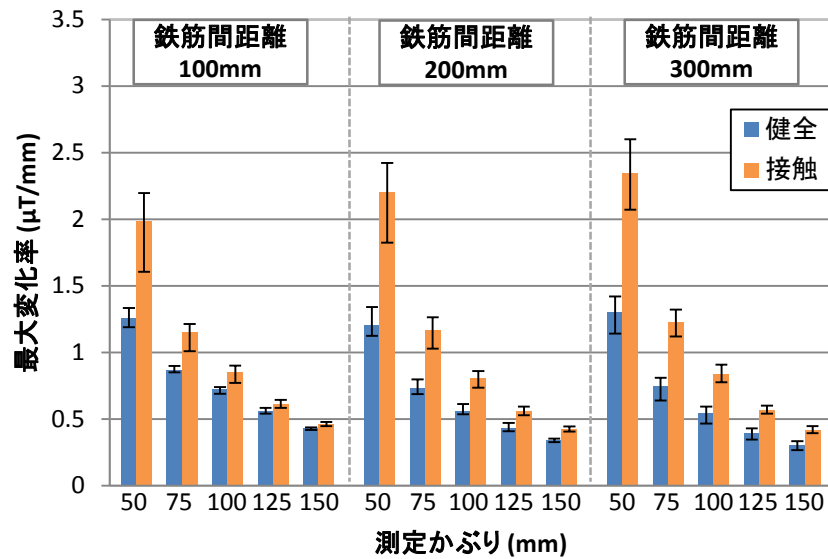


図 4-5 両隣のスターラップとの距離と最大変化率の関係

図 4-5 より、鉄筋間距離が短くなるにつれて最大変化率は健全ではやや大きく、接触では小さくなる傾向が見られる。これと図 4-2 のピーク値の変動を合わせて考えると、両隣の健全鉄筋の影響によりピーク位置より端部側では健全・接触ともにグラフの傾きが急になるが、ピーク位置より隅角部側のグラフの傾きは健全で急に、接触で緩やかになっていることが分かる。

図 4-4 より、鉄筋間距離が短くなることで、健全の補正ピーク値はやや減少するかほぼ変化しないのに対し、接触の補正ピーク値は減少している。これは、上記のように鉄筋間距離が短くなることによる隅角部付近でのグラフの傾きの変動と図 4-3 に見られるピーク位置の減少の結果、接触のみが明確に減少したと考えられる。

診断指標である補正ピーク値、最大変化率ともに両隣の健全鉄筋との距離が小さくなるほど健全と接触の差が小さくなり、破断の有無の診断は難しくなる傾向があると言える。

## (2) 配筋ピッチごとの診断可能性

測定鉄筋を中心に  $y = -300 \sim 300$  の範囲で健全鉄筋を配置したケース 2-1, 2-2, 1-2, 1-3 から得られた補正ピーク値と最大変化率の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 4-6, 図 4-7 に示す。

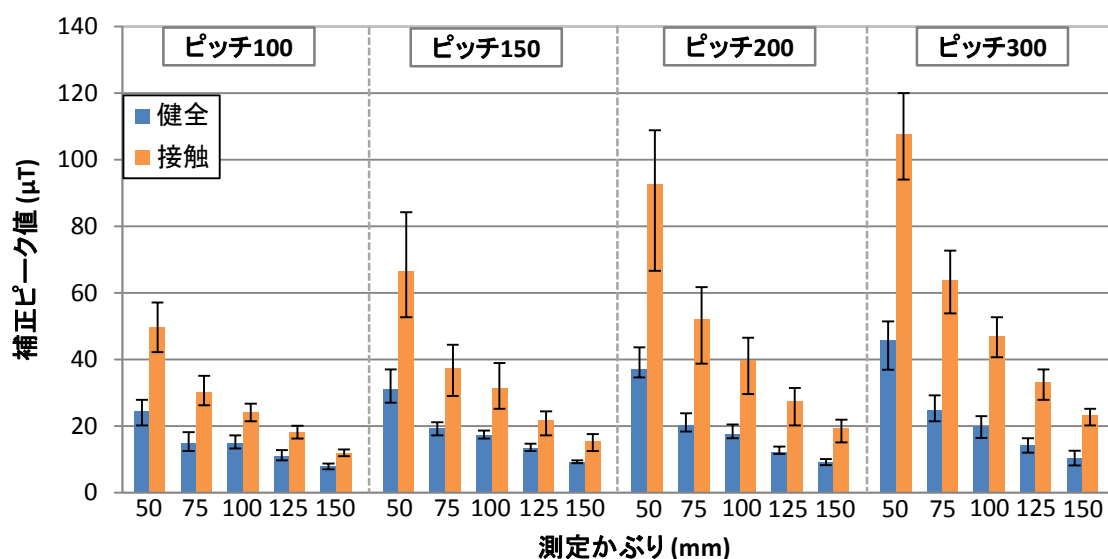


図 4-6 配筋ピッチと補正ピーク値の関係

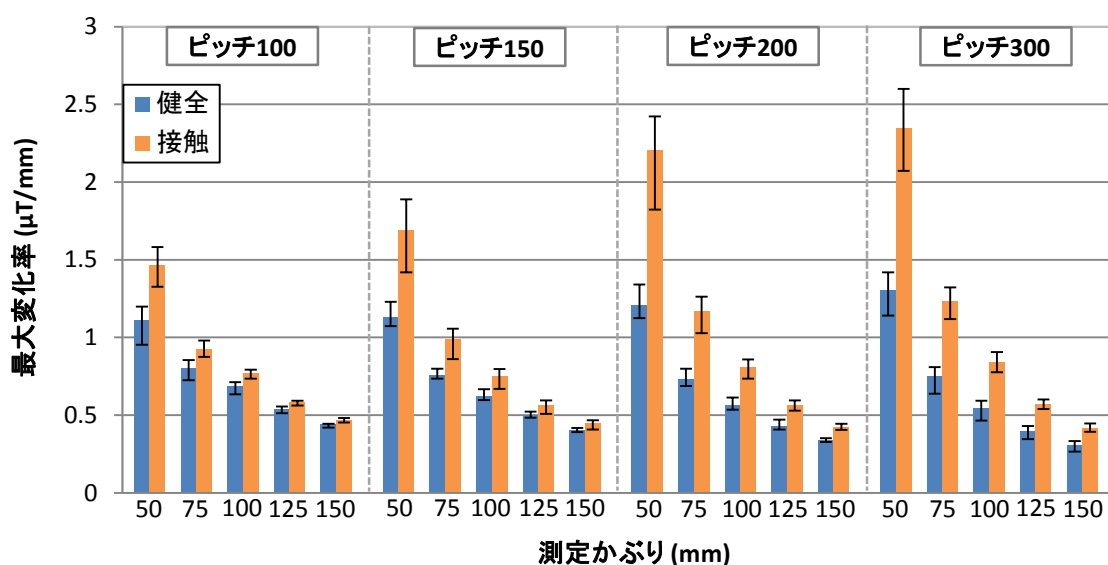


図 4-7 配筋ピッチと最大変化率の関係

図 4-6 より、ピッチが短くなるほど補正ピーク値は健全・接触ともに小さくなり、特に接触での減少が顕著となった。ピッチ 100mm に関しては、図 4-4 の鉄筋間距離 100mm と補正ピーク値と比較すると値が明らかに小さくなっていることから、200mm、300mm 離れた健全鉄筋からもピーク位置が小さくなる影響を受けているものと考えられる。

図 4-7 より、ピッチが短くなるほど接触の最大変化率の値が小さくなっていることがわかる。健全についてはピッチが短くなるにつれて測定かぶり 75～150mm で最大変化率が大きくなっているが、測定かぶりが 50mm と小さい場合では健全の値はピッチによりほとんど変化しなかったため、測定かぶりが小さいほうが比較的診断が容易であると考えられる。

ピッチごとの診断の可能性を第 3 章で説明した安全性指標  $\beta$  を用いて評価する。  $\beta$  は式 (4.1) で表される。

$$\beta = \frac{\lambda_r - \lambda_i}{\sqrt{\zeta_i^2 + \zeta_r^2}} \quad (4.1)$$

ここに、

$\lambda_i$  : 健全の診断指標の対数平均値

$\zeta_i$  : 健全の診断指標の対数標準偏差

$\lambda_r$  : 接触の診断指標の対数平均値

$\zeta_r$  : 接触の診断指標の対数標準偏差

図 4-6, 図 4-7 から得られた補正ピーク値, 最大変化率の安全性指標の値を表 4-2 に示す。 どちらの指標もピッチが大きくなると信頼性指標の値が大きくなる傾向があり, 診断が容易になることがわかる。

ここで, 誤判定確率が 2.275% となる安全性指標の値 2 に注目すると, 表 4-2 より補正ピーク値はピッチ 100~300mm, 測定かぶり 50~150mm の全てのケースで安全性指標の値が 2 以上となっている。 一方, 最大変化率はピッチが 100mm, 150mm と小さい場合では測定かぶりによっては安全性指標の値が 2 を下回るケースが見られた。 ピッチが 200mm, 300mm と大きい場合では, 50~150mm のどの測定かぶりでも 2 を大きく上回っていることから最大変化率を用いた判定は十分可能である。 以上より, ピッチが 100mm, 150mm と小さい場合は補正ピーク値で, ピッチが 200mm, 300mm と大きい場合は補正ピーク値と最大変化率の両方を用いて破断の有無を判定できると考えられる。

表 4-2 ピッチごとの安全性指標

診断指標	ピッチ (mm)	測定かぶり(mm)				
		50	75	100	125	150
補正ピーク値	100	3.86	3.52	3.55	3.80	3.67
	150	3.22	3.28	2.83	2.62	2.71
	200	3.92	4.23	3.83	4.05	4.25
	300	5.22	5.12	5.24	5.14	4.40
最大変化率	100	2.44	1.92	2.10	2.14	2.05
	150	2.75	2.47	1.99	1.63	1.59
	200	4.23	4.33	3.87	3.37	4.34
	300	4.81	4.19	3.79	3.69	2.92



### 4.1.3 判断基準の統合

前項の結果より，信頼性指標の値が十分に大きいピッチ 100mm, 150mm, 200mm, 300mm での補正ピーク値とピッチ 200mm, 300mm での最大変化率を用いて，ピッチ 100～200mm, 200～300mm の区間での破断の有無の判断基準を作成する．ピッチの各区間で安全性指標が最少となる健全・接触の分布の組合せで第 3 章に示した式(3.8)で境界となる値を計算した．ピッチ区間ごとの判断基準の境界値を表 4-3 に示す．

表 4-3 ピッチ区間ごとの破断の有無の境界値

ピッチ (mm)	診断指標	測定かぶり(mm)				
		50	75	100	125	150
100～200	補正ピーク値	40.6	23.5	20.3	14.0	9.7
	( $\mu T$ )	54.9	32.4	24.3	17.3	13.9
200～300	最大変化率	1.53	0.94	0.69	0.49	0.38
	( $\mu T/mm$ )					

表 4-3 中のピッチ 100～200mm 区間の境界値と，図 4-6 のピッチ 100mm, 150mm, 200mm の補正ピーク値を図 4-8 に示す．図 4-8 より，接触状態の鉄筋は測定かぶり 50～150mm の範囲で全て正しく判定できている．一方，健全鉄筋については 75 回中 5 回「破断あり」と誤判定された．ピッチが 100～200mm と比較的小さい区間では鉄筋状態の判定基準がやや安全側に偏っているが，測定かぶりが 50～150mm の範囲で破断している鉄筋を抽出できると考えられる．

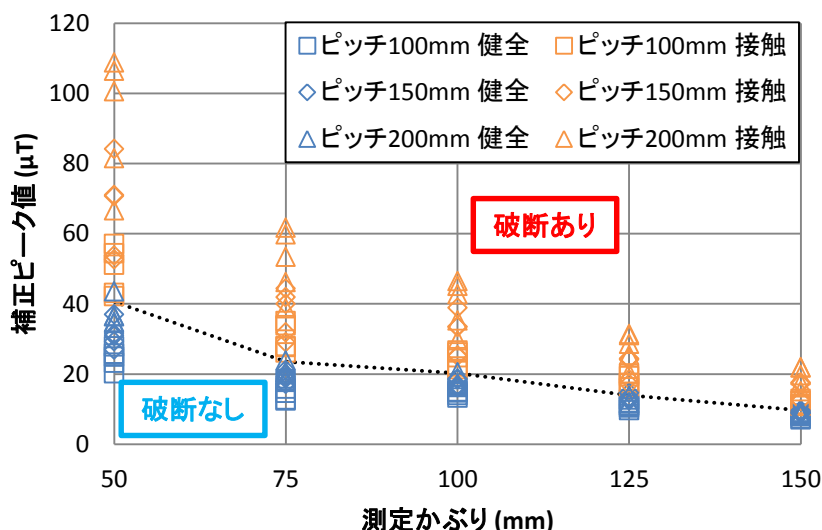


図 4-8 ピッチ 100～200mm の補正ピーク値の判断基準

表 4-3 中のピッチ 200～300mm 区間の境界値と、図 4-6, 図 4-7 のピッチ 200mm, 300mm の補正ピーク値・最大変化率に第 3 章で行った測定鉄筋 1 本のみのデータ (図 3-12, 図 3-13 参照)を加えたものをそれぞれ図 4-9, 図 4-10 に示す。図 4-9, 図 4-10 より, ピッチ 200mm, 300mm のデータはどちらの指標でも測定かぶり 50～150mm において鉄筋状態を正しく診断できた。測定鉄筋 1 本のみ (ピッチ:  $\infty$ ) のデータに対しこの区間の判断基準を適用すると, 補正ピーク値では健全鉄筋の 1 回を除き正しく診断できた。最大変化率に関しては, 測定かぶり 50～125mm では健全, 接触ともに全て正しく診断できたが, 測定かぶり 150mm では 5 回中 3 回「破断なし」と誤判定された。以上より, ピッチが 300mm 以上のケースに対し, ピッチ 200～300mm 区間の判断基準を適用することは概ね可能であるが, 診断条件がやや厳しくなる測定かぶり 150mm での最大変化率などに対しては注意が必要である。

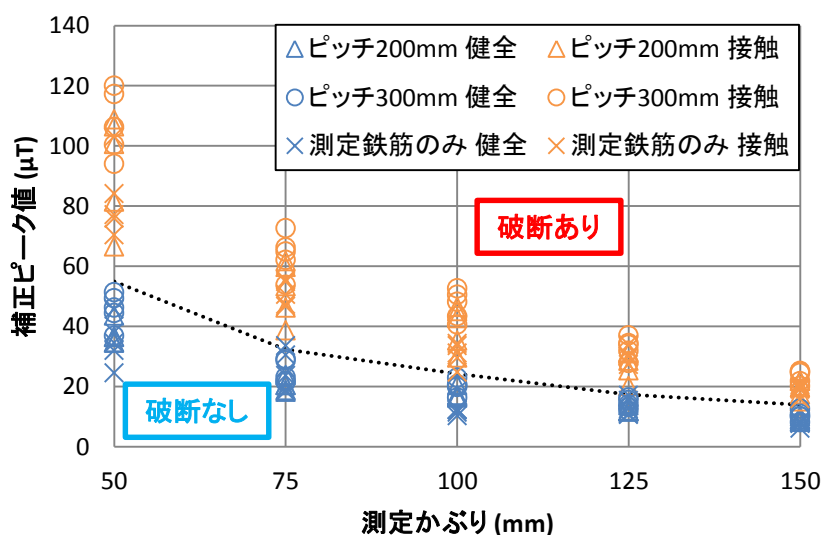


図 4-9 ピッチ 200～300mm の補正ピーク値の判断基準

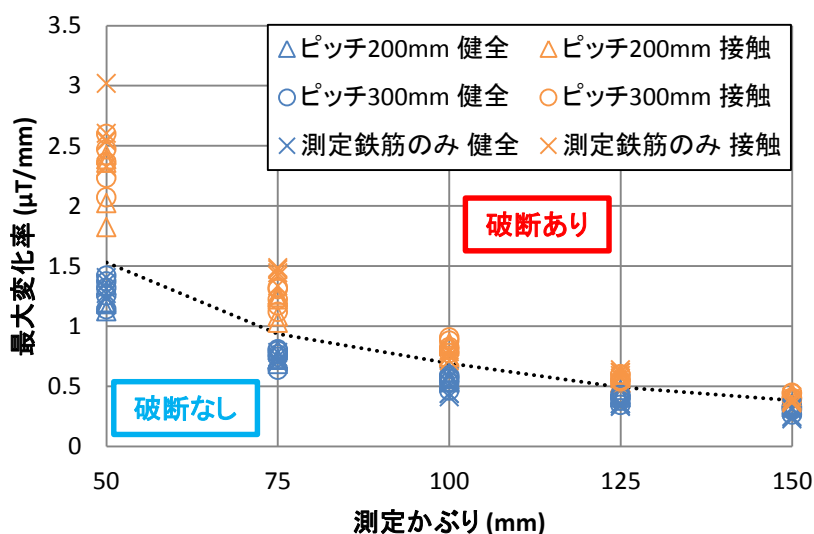


図 4-10 ピッチ 200～300mm の最大変化率の判断基準

## 4.2 実在する橋梁での診断

実験結果により得られた破断の有無の判定基準と実在する橋脚で行ったスターラップの片面診断結果を比較し、その適用性に関する検討を行う。

### 4.2.1 フィールド試験概要

#### (1) 対象構造物

診断対象は北陸地方にある跨線橋の下部工で、1968年に建設された張出式ラーメン式橋脚である。診断対象の外観を写真 4-1 に示す。建設後 18 年経過した 1986 年、ASR によるひび割れが著しいことから、ひび割れ注入と表面防水塗膜による補修が実施されている。しかし対策後も ASR が進行し、梁部の表面塗膜上に水平方向の連続したひび割れが発生し再劣化が著しいことから、2010 年に磁気法による梁部の鉄筋破断の非破壊調査およびはつり調査を実施した。

#### (2) 事前調査

フィールド試験では漏洩磁束法を適用する前の準備として、まず橋脚梁部のコンクリート隅角部付近のスターラップを中心に鉄筋探査を行った。探査には RC レーダー（日本無線（株）製）とストラクチャスキャン（GSSI 製）を用いた。診断対象の配筋の概略図を図 4-11 に示す。診断するスターラップの鉄筋径は D16、本数は 9 本であり、端部側から順に①～⑨とする。鉄筋探査の結果、スターラップ①～⑨の側面側のかぶりは 94～171mm、下面側のかぶりは 47～77mm と推定された。また、スターラップ①～⑨のピッチは 200～290 である。

#### (3) 診断手順

側面側は実験で行ったかぶり 150mm を超えるものがあったため、梁の下面側からの診断を行うものとした。鉄筋の位置、かぶりを推定した後に行ったフィールド試験の手順を図 4-12 に示す。診断装置は実験と同じく写真 2-6 に示す磁石ユニットおよび磁気計測ユニットを使用した。

まず梁下面からの着磁を鉄筋①～⑨直上で行い、磁束密度を計測した。橋脚梁下部のスターラップ①～⑨のかぶりおよび着磁開始位置を表 4-4 に示す。ここで、磁石ユニットの中心を位置を合わせる基準面とし、着磁終了位置は隅角部から 500mm の位置とした。この時、磁石ユニットの底面にスペーサーを取り付け、着磁を行うかぶりを 50mm 大きくした。最後に着磁を行った鉄筋⑨については、直上での着磁の影響が残っているため診断対象外とした。

片面診断後、側面からも着磁を行う両面診断を行い、鉄筋①、②については更にはつり調査を実施し、鉄筋の状態と実際のかぶりを確認した。



写真 4-1 診断対象外観

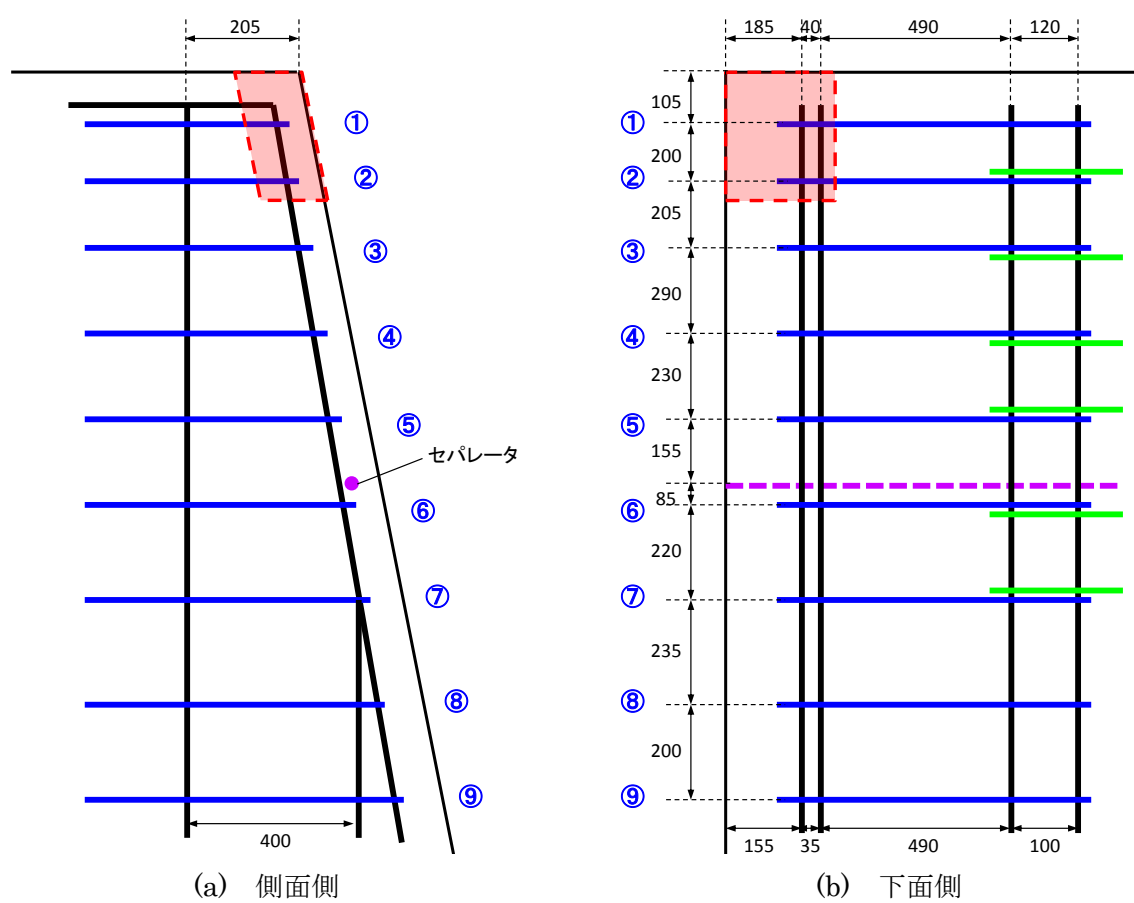


図 4-11 診断対象鉄筋配筋概略図

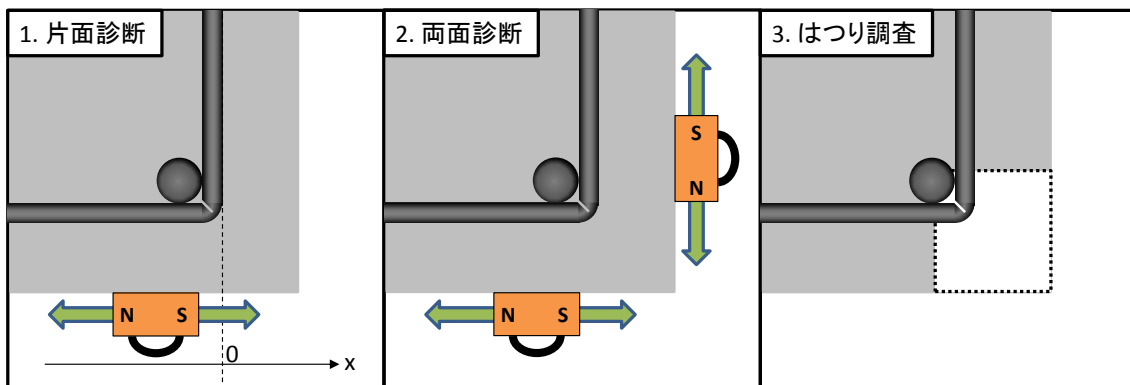


図 4-12 フィールド試験の診断手順

表 4-4 診断対象鉄筋一覧

測定鉄筋	①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧	⑨
推定かぶり(mm)	56	47	51	56	56	67	77	73	69
実かぶり(mm)	58	54	—	—	—	—	—	—	—
着磁開始位置(mm)	-81	-73	-65	-50	-48	-34	-38	-4	5

#### 4.2.2 フィールド試験結果

##### (1) 測定磁束密度グラフの形状

鉄筋①～⑧の補正磁束密度および区間平均変化率をそれぞれ図 4-13, 図 4-14 に示す。ここで図 4-13 のグラフが上に凸の形状となっているのは磁石ユニットの向きが実験と逆になっているためである。図 4-13 より、鉄筋③, ⑤のように局所的な谷型, 山型の波形が重畳されるケースも見られた。これは診断対象鉄筋の付近に事前の探査では特定できなかった鉄筋等が配置されていたことが原因として考えられる。このため、グラフ全体の概形から診断指標がこの影響を受けていないかを確認する必要がある。

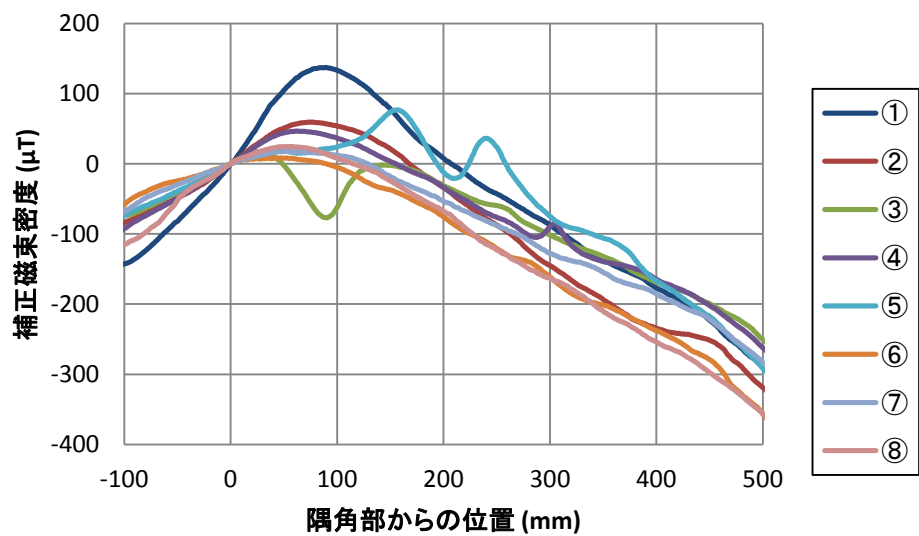


図 4-13 フィールド試験の補正磁束密度

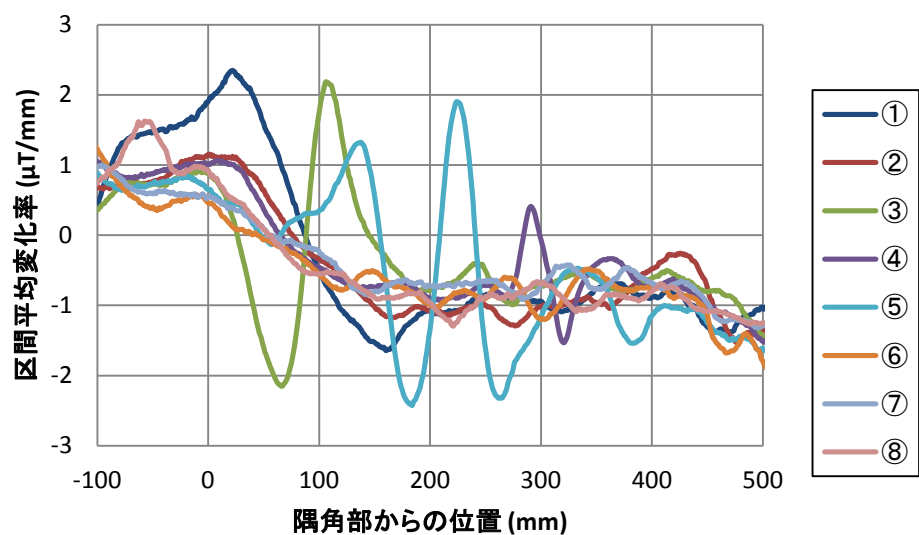


図 4-14 フィールド試験の区間平均変化率

## (2) 診断指標と判断基準の比較

図 4-13, 図 4-14 から得られる鉄筋①～⑧の補正ピーク値および最大変化率と表 4-3 から得られるピッチ 200～300mm の判定基準をそれぞれ図 4-15, 図 4-16 に示す. ここで, 補正ピーク値は図 4-13 の補正磁束密度の最大値, 最大変化率は図 4-14 の隅角部からの位置が  $x = -100 \sim 50 \text{ mm}$  の範囲の最大値をとり, 表 4-4 より鉄筋①, ②は実測したかぶり, 鉄筋③～⑧は推定したかぶりを横軸にとった. また破断の有無の判断基準は表 4-3 の値を累乗近似したものとした.

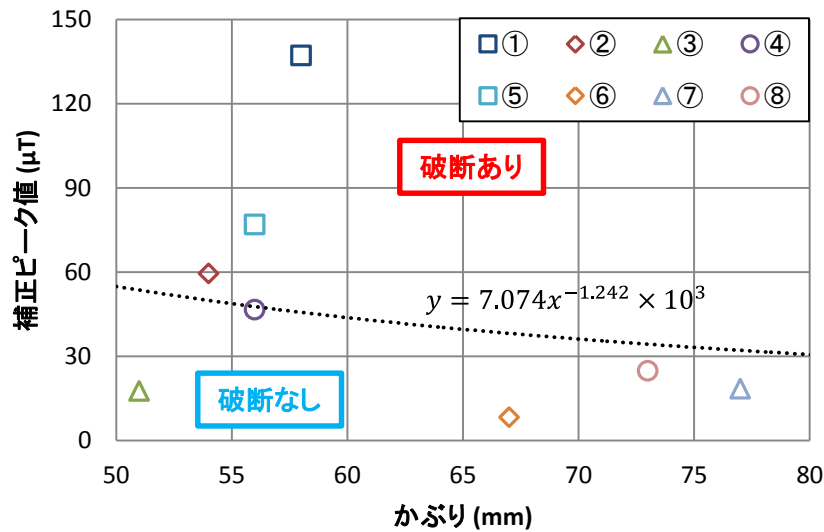


図 4-15 フィールド試験の補正ピーク値

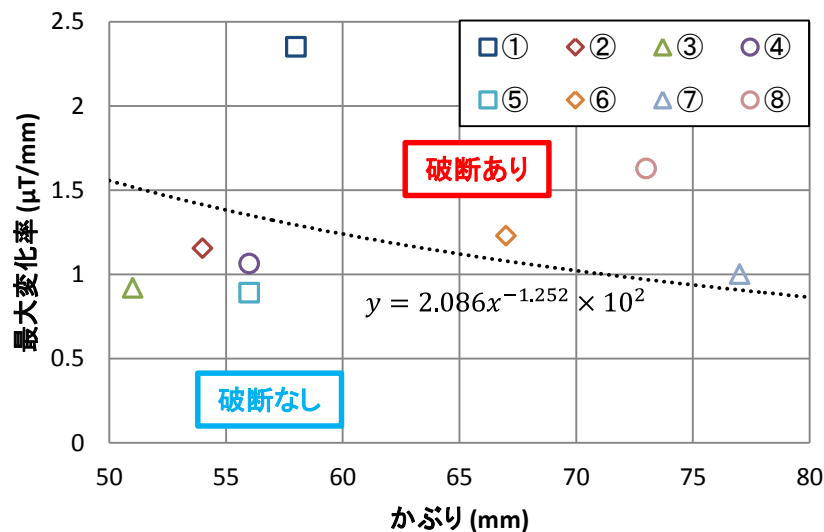


図 4-16 フィールド試験の最大変化率

図 4-15, 図 4-16 より得られるフィールド試験での鉄筋状態の片面診断結果と, その後行った両面診断およびはつり調査の結果を表 4-5 に示す. ここで, 図 4-13 で谷型, 山型の波形が重畳された鉄筋③, ⑤の補正ピーク値と, 図 4-14 で  $x = -100 \sim 50mm$  の範囲の極大値が  $x = -100mm$  の位置で得られた⑤, ⑥, ⑦の最大変化率は指標を得る箇所のグラフ形状に問題があるものとした. 片面診断結果の総合評価として, 補正ピーク値, 最大変化率の両方ともグラフ形状に問題がなく得られたケースでは, 2つの診断指標の判定結果が「破断なし」または「破断あり」と一致した場合はその判定結果を採用し, 両者が一致しない場合は「判定不可」とした. 診断指標のどちらかがグラフ形状により問題がある場合は正

しく得られた指標の判定結果を採用し、両方ともグラフ形状に問題がある場合は「判定不可」とした。

片面診断より診断の精度が高いと考えられる両面診断の結果では鉄筋①のみが「破断あり」、鉄筋②～⑧は「破断なし」と判定され、はつり調査の結果では鉄筋①が「破断あり」、鉄筋②が「破断なし」だった。片面診断では「破断あり」の鉄筋①については実験により得られた判断基準から余裕を持って正しく判定できていることがわかる。「破断なし」と考えられる鉄筋②～⑧に関しては「破断なし」または「判定不可」と診断されており、総合評価として誤判定されることはなかった。補正ピーク値、最大変化率の 2 つの診断指標を用いることで測定磁束密度のグラフ形状が複雑になった場合でもいずれかまたは両方の指標で総合評価を与えることができる。

表 4-5 フィールド試験の鉄筋状態診断結果

		①	②	③	④	⑤	⑥	⑦	⑧
片面診断	補正ピーク値	×	×	※○	○	※×	○	○	○
	最大変化率	×	○	○	○	※○	※×	※×	×
	総合評価	×	△	○	○	△	○	○	△
両面診断		×	○	○	○	○	○	○	○
はつり調査		×	○	-	-	-	-	-	-

○：破断なし，×：破断あり，△：判定不可，※：グラフ形状に問題あり

#### 【参考文献】

- 1) 土木学会：「2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」，pp.325-326，2013.3.



## 第 5 章 鉄筋状態のスクリーニングに関する検討

### 5.1 簡易な着磁方法による帯磁状況の違い

第 3 章，第 4 章の結果より，漏洩磁束法片面診断では最大でかぶり 150mm 程度まで健全鉄筋と破断鉄筋の区別が可能であることがわかった．ここで，破断の有無の判断基準が破断ギャップ 0mm と厳しい診断条件を想定し安全側に設定されていること，実際の構造物では破断している鉄筋より破断していない鉄筋のほうが多いであろうことを考えると，破断していない鉄筋の誤診断が起り得ると予想される．また，対象鉄筋群に対して 1 本ずつ長手方向に着磁を行う手間も考慮すると，片面診断を行う前のある程度の精度で鉄筋状態のスクリーニングを行うことができれば診断精度の向上および簡易化につながると考えられる．本章ではより簡易な着磁方法を考案し，その着磁方法を用いて鉄筋状態のスクリーニングを行う手法について検討する．

#### 5.1.1 解析概要

##### (1) 解析方法

鉄筋内部および隅角部周辺の帯磁状況を明らかにするために有限要素法による 3 次元静磁場解析を行う．解析ソフト，解析モデルは第 2 章で行ったものと同様である．表 5-1 に解析ケース一覧を示す．

##### (2) 着磁方法

解析に用いた外場磁石の概要を図 5-1 に，磁石の動かし方の詳細を表 5-2 に示す．ここで，スターラップ曲げ加工部のかぶり上縁の交点を原点とした．第 2 章の片面診断では測定鉄筋の長手方向に磁石を往復させたが，本節では鉄筋直上での着磁範囲を極端に狭めたもの，つまり隅角部に磁石を置き主鉄筋に沿う方向にスライドさせるという着磁方法をとった．以下に着磁過程の概要を記す．

過程①(step 1～11)：測定鉄筋直上( $Y = 0$ )にて，隅角部に磁石を接近させる．

過程②(step 12～27)：測定鉄筋直上( $Y = 0$ )から  $Y = 800$  の位置まで磁石をスライドさせる．

過程③(step 28～38)：800mm 隣( $Y = 800$ )にて，磁石を測定面から遠ざける．

表 5-1 解析ケース一覧

ケース	かぶり(mm)	主鉄筋	桁鉄筋	スターラップ
10-1	78.5	あり	あり	健全
10-2				破断
10-3			なし	健全
10-4				破断

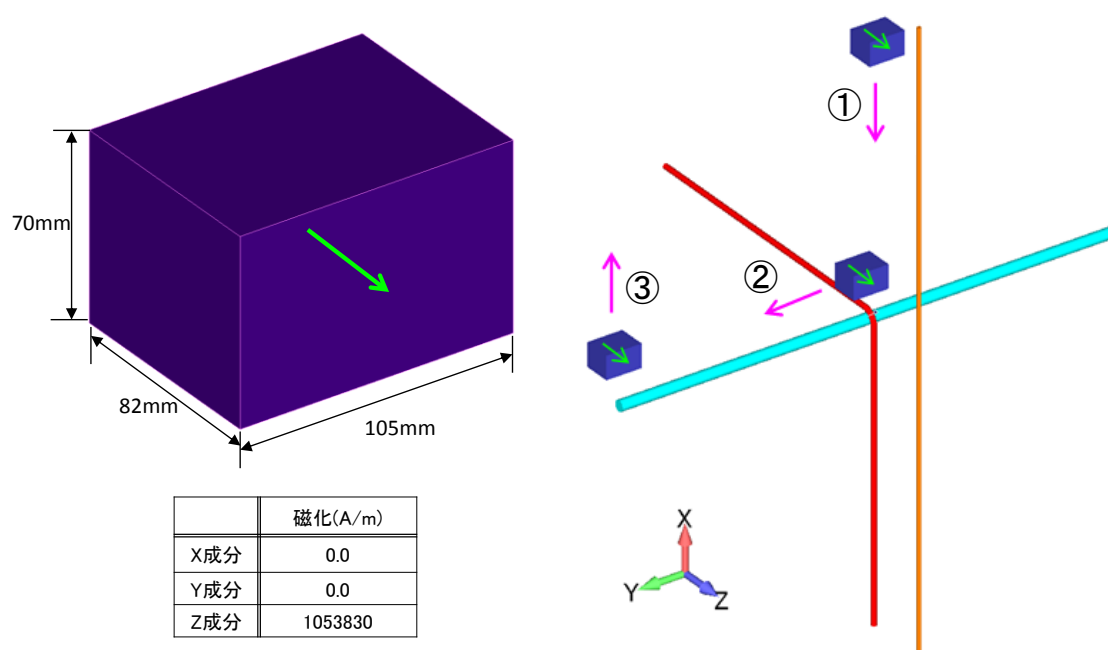


図 5-1 外場磁石概要

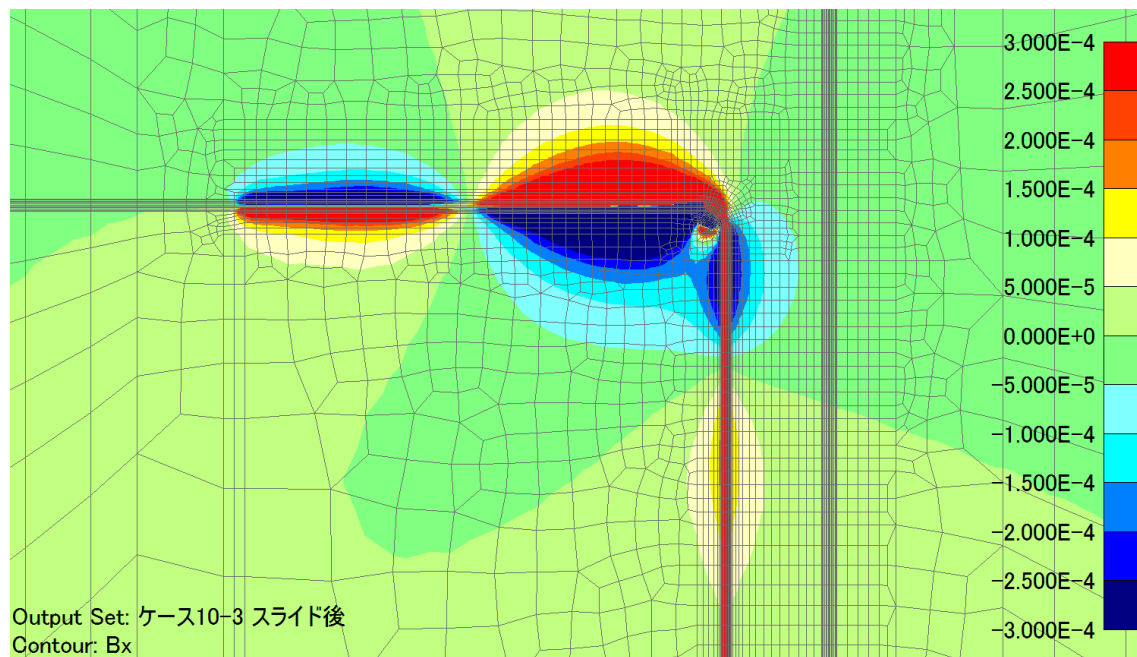
表 5-2 外場磁石の動かし方

①	step	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	X (mm)	1045	795	545	445	345	295	245	220	195	145	123.5
	Y (mm)	0										
	Z (mm)	10										
②	step	12	13	14	15	16	17	18	19	<div></div>		
	X (mm)	123.5										
	Y (mm)	50	100	150	200	250	300	350	400			
	Z (mm)	10										
	step	20	21	22	23	24	25	26	27	<div></div>		
	X (mm)	123.5										
	Y (mm)	450	500	550	600	650	700	750	800			
	Z (mm)	10										
③	step	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38
	X (mm)	123.5	145	195	220	245	295	345	445	545	795	1045
	Y (mm)	800										
	Z (mm)	10										

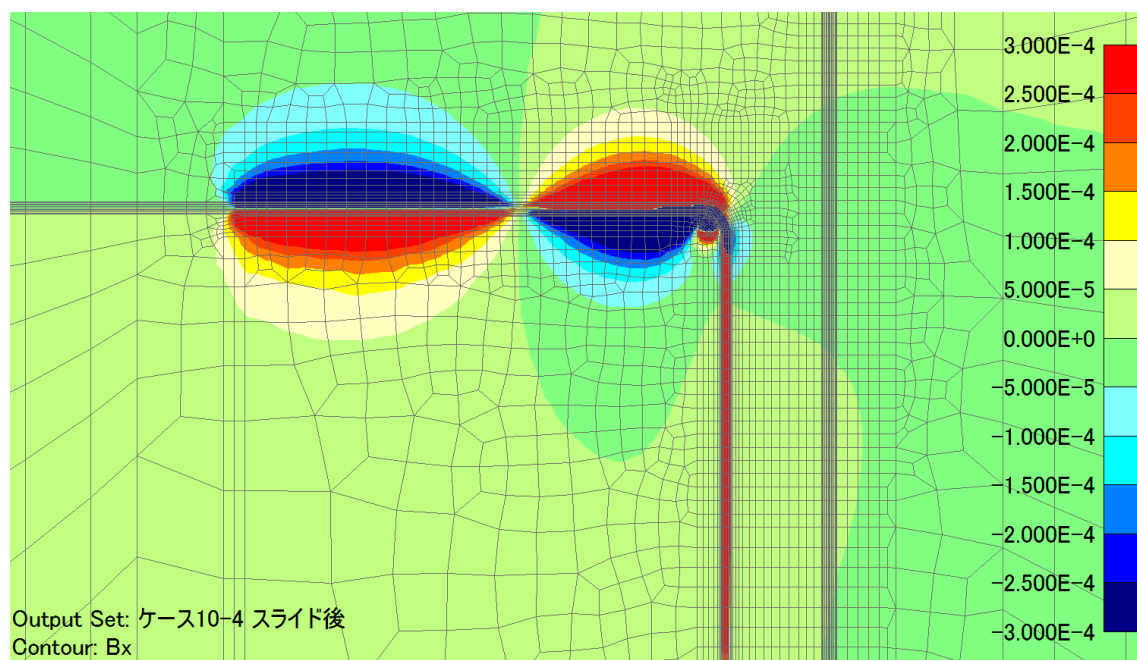
### 5.1.2 鉄筋隅角部の磁束密度分布

#### (1) スターラップの帯磁状況

ケース 10-3, 10-4 において，着磁終了後の磁束密度成分  $B_x$  と  $B_z$  のコンターをそれぞれ図 5-2 と図 5-3 に，推定されるスターラップ内磁束と帯磁状況の模式図を図 5-4 に示す．

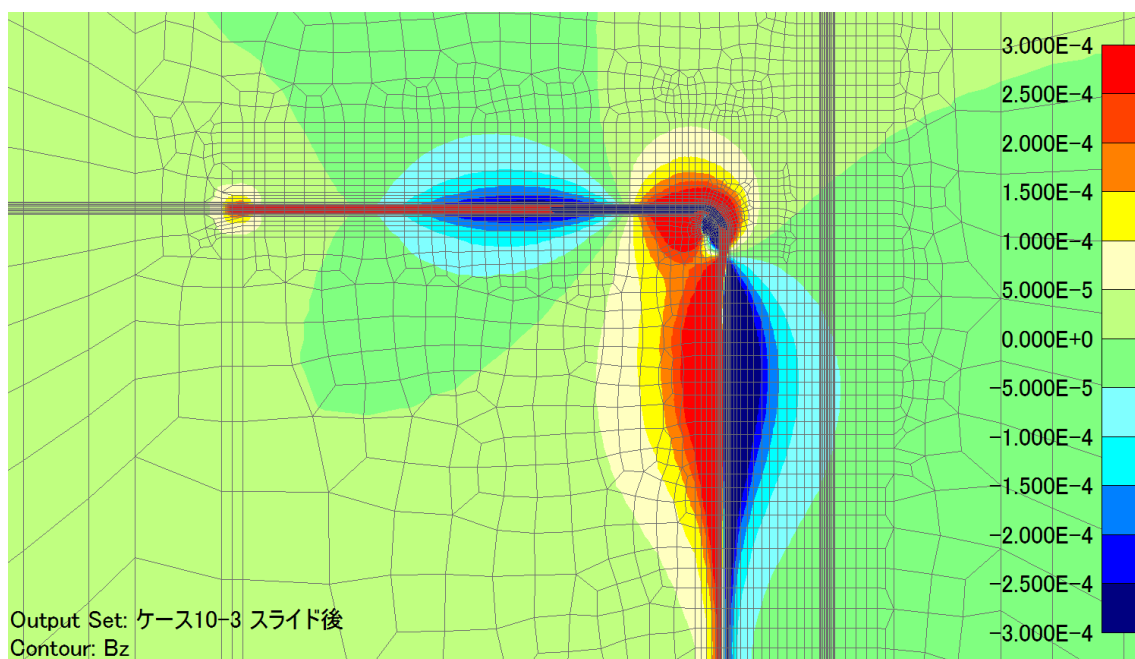


(a) 健全

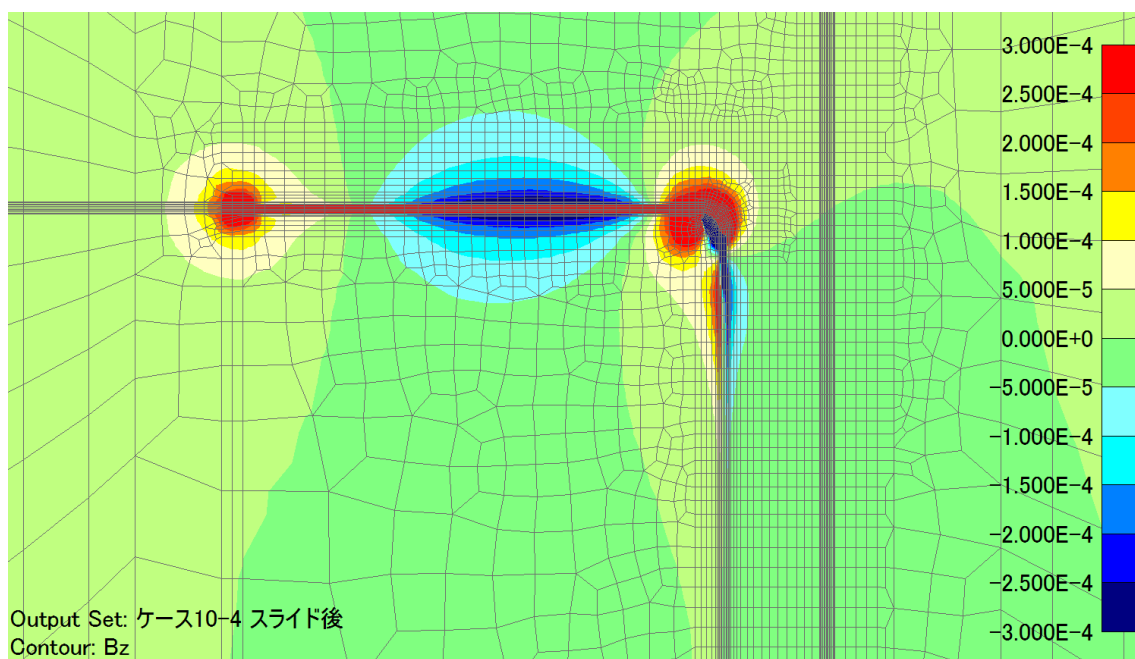


(b) 破断

図 5-2 ケース 10-3, 10-4 着磁後 磁束密度コンターZX 断面  $B_x$  成分 (↑)



(a) 健全



(b) 破断

図 5-3 ケース 10-3, 10-4 着磁後 磁束密度コンターZX 断面 Bz 成分 (→)

図 5-4 より、健全では上面側で S 極、側面側の隅角部付近で N 極の影響が強く表れるのに対し、破断鉄筋では側面側のみが強く帯磁し、隅角部付近で N 極、端部側で S 極の影響が表れるなど破断の有無により帯磁状況に違いが生じた。鉄筋内部の磁束の流れに着目すると、健全では上面側から側面側の隅角部付近へ磁束が流れているのに対し、破断では側

面側の端部から隅角部の方向に磁束が流れている。これは、磁石が隅角部付近を通過することにより、健全ではスターラップが上面側部分も含めて着磁されるのに対し、破断では磁石の S 極の影響により側面側の隅角部に N 極が生じ、その影響を受けて端部側に S 極が生じたものと考えられる。

図 5-4 中の磁束密度測定箇所（かぶり：78.5mm）での Bx 成分を図 5-5 に示す。健全・破断ともに隅角部から 150～200mm 程度離れた位置で植えに凸のピークを持つ形状となり、隅角部から 200mm 以上離れた位置において磁束密度のグラフに明確な差が見られることから、磁束密度のグラフ形状を評価することによる破断の有無の診断の可能性が示された。

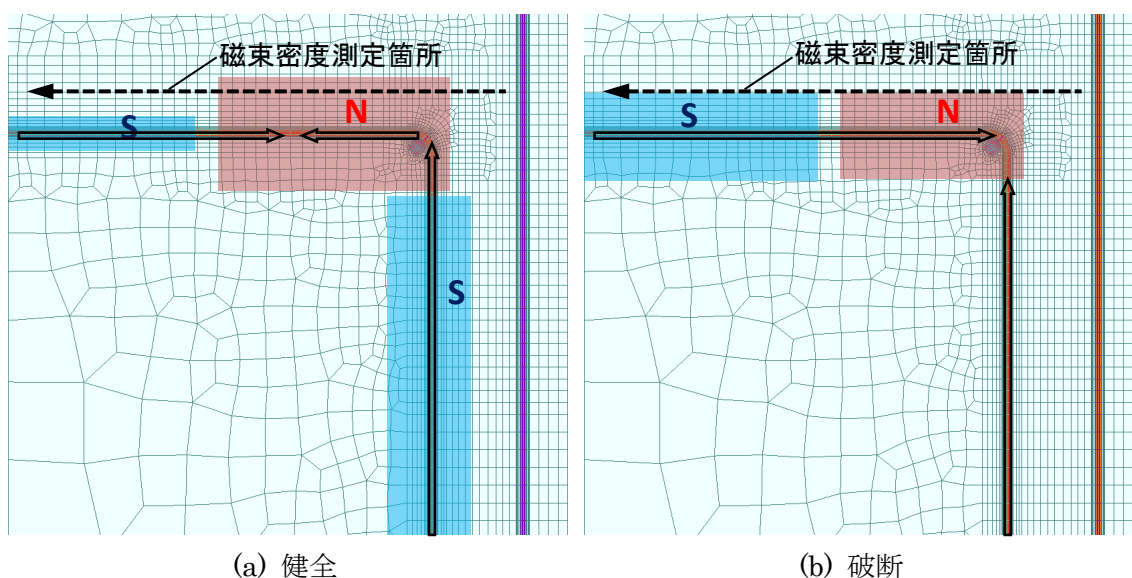


図 5-4 ケース 10-3, 10-4 着磁後 スターラップ帯磁状況模式図

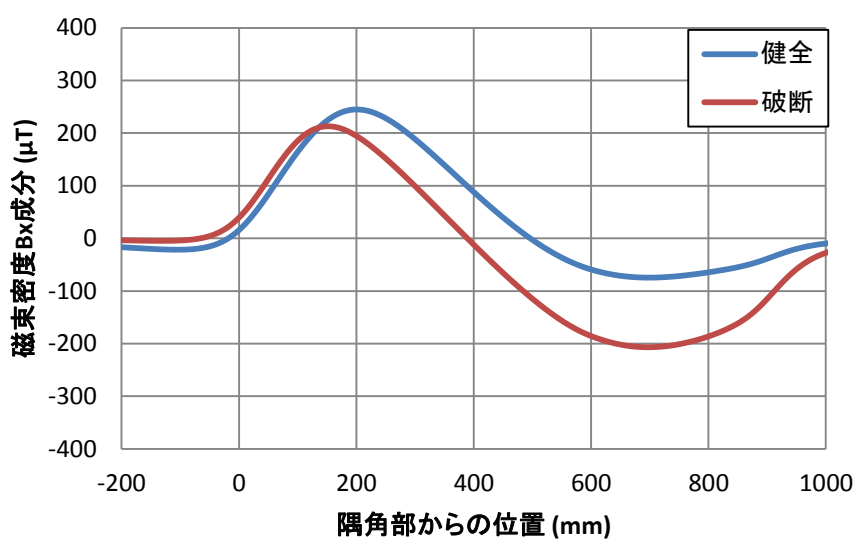
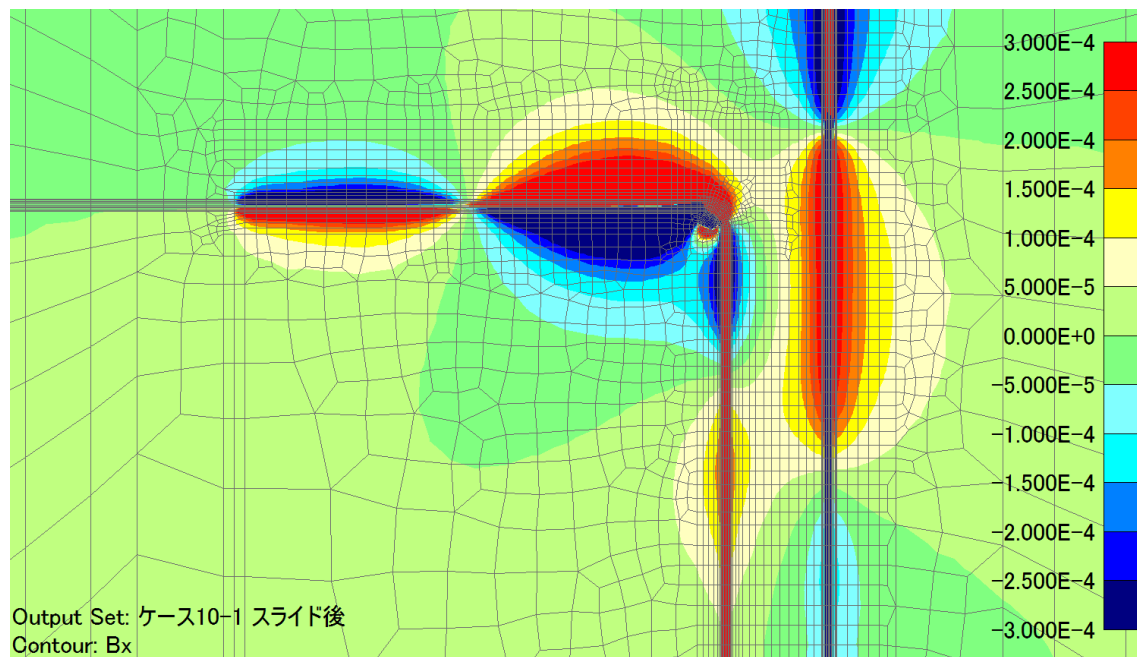


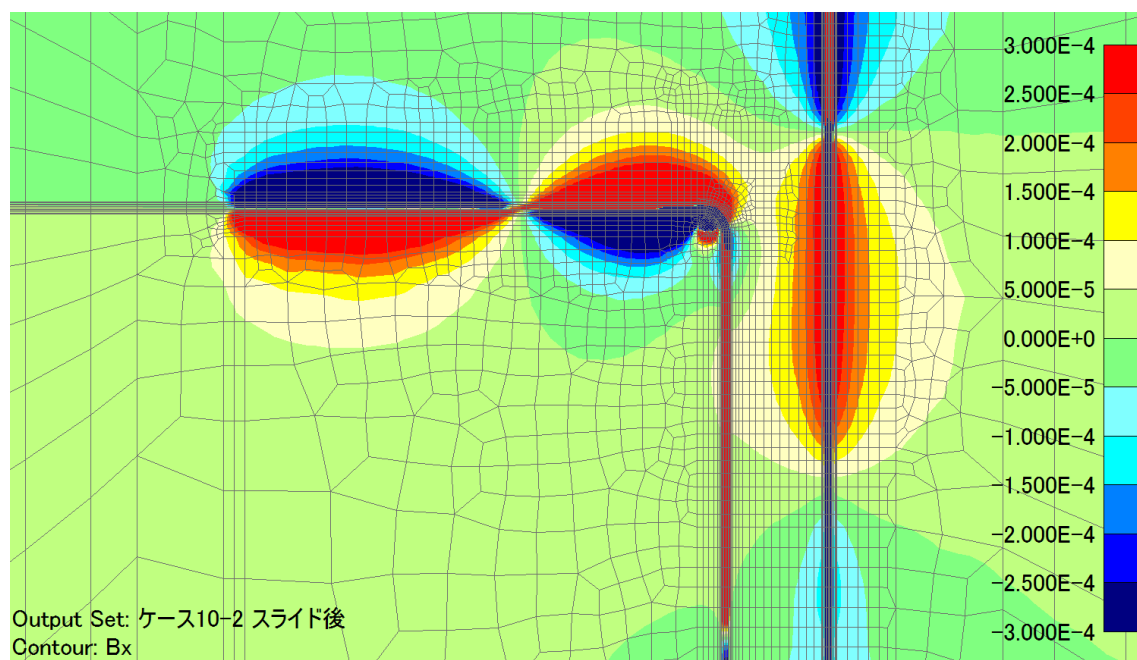
図 5-5 ケース 10-3, 10-4 着磁後 測定面の磁束密度成分 Bx

## (2) 桁鉄筋の帯磁状況

桁鉄筋を配置したケース 10-1, 10-2 の着磁終了後の磁束密度成分  $B_x$  と  $B_z$  をそれぞれ図 2-12 と図 2-13 に示す。また、図 5-6, 図 5-7 から推定されるスターラップおよび桁鉄筋内部磁束の方向と帯磁状況の模式図を図 5-8 に示す。

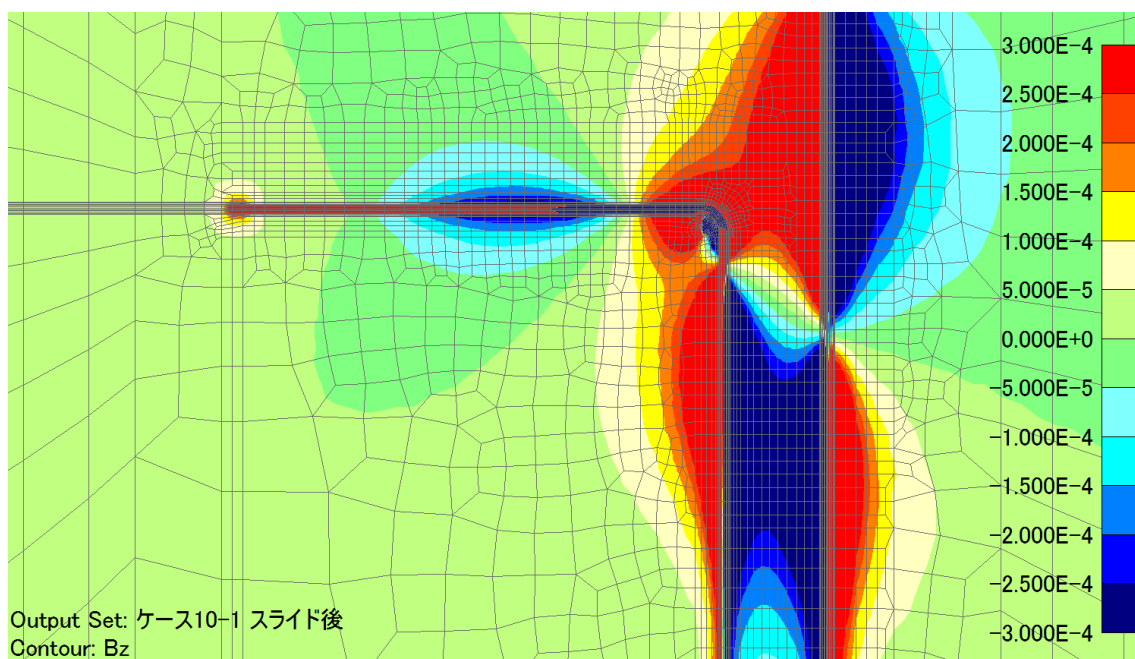


(a) 健全

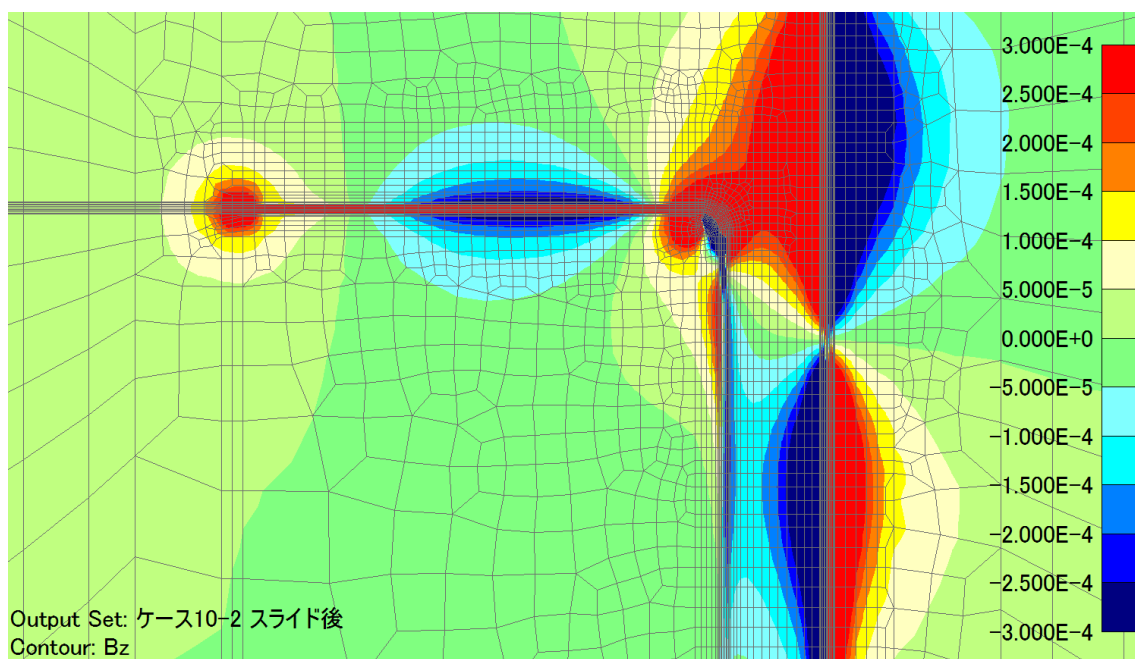


(b) 破断

図 5-6 ケース 10-1, 10-2 着磁後 磁束密度コンターZX 断面  $B_x$  成分 (↑)



(a) 健全



(b) 破断

図 5-7 ケース 10-1, 10-2 着磁後 磁束密度コンターZX 断面 Bz 成分 (→)

図 5-8 より，着磁終了後桁鉄筋は磁石の N 極が近づいた影響により，磁石をスライドさせたかぶり 78.5mm の位置付近で S 極となっている．ここで，図 5-4 と図 5-8 を比較すると，健全・破断ともにスターラップの帯磁状況はほぼ同様であり，桁鉄筋が存在する場合でも健全のスターラップは鉄筋の上面側部分まで帯磁できていることが確認できる．

図 5-8 中の磁束密度測定箇所（かぶり：78.5mm）での  $B_x$  成分を図 5-9 に示す。桁鉄筋が帯磁された結果、図 5-9 に示すように、桁鉄筋を配置した位置付近で磁束密度  $B_x$  成分が極端に大きくなっているが、隅角部から 150～200mm の位置に表れる上に凸のピークより端部側での磁束密度  $B_x$  成分の差は図 5-5 と同様に生じているため、桁鉄筋が存在する場合でも破断の有無の診断は可能であると考えられる。

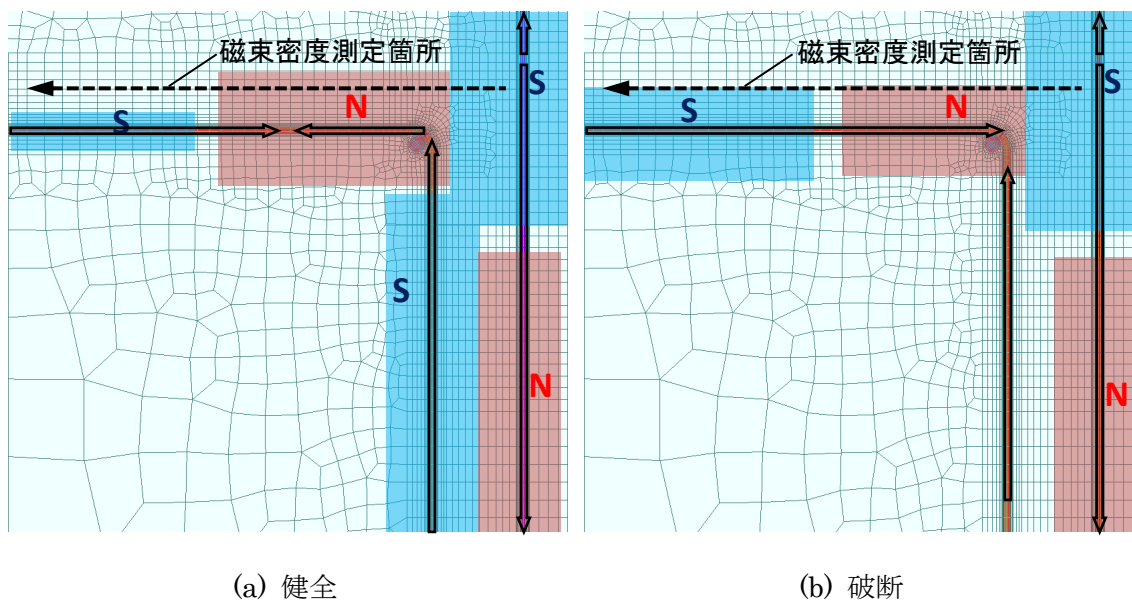


図 5-8 ケース 10-1, 10-2 着磁後 スターラップ帯磁状況模式図

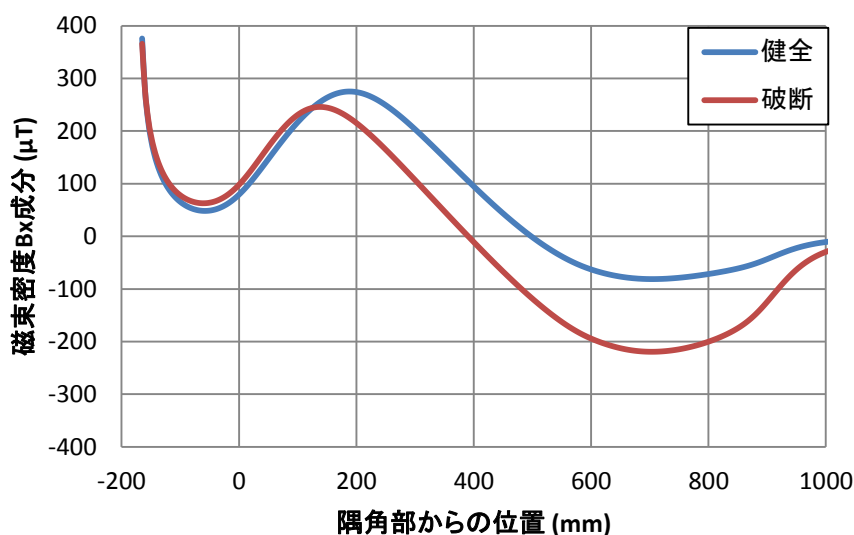


図 5-9 ケース 10-1, 10-2 着磁後 測定面の磁束密度成分  $B_x$



### (3) 磁束密度グラフ形状の評価

図 5-4, 図 5-8 より, 隅角部付近の N 極の影響, 隅角部から離れた位置の S 極の影響を評価する指標をとることで破断の有無の差を明確にする方針とした. まず, 隅角部付近の N 極の影響の評価については, 図 5-5, 図 5-9 の測定面での磁束密度より, 健全・破断ともに隅角部から 150~200mm 程度離れた位置に表れる上に凸のピークの値(ピーク値)とその位置(ピーク位置)を指標として用いることが考えられる. また, 隅角部から離れた位置の S 極の影響の評価については, ピークから十分離れており独立していること, 鉄筋端部の影響を受けないことを考慮し, 隅角部から 500mm の位置での磁束密度(500 磁束密度)を指標とした.

更に, 第 2 章と同様に地磁気等の環境磁場の影響を考慮した相対的な評価を行う指標について検討する. 図 5-5, 図 5-9 で隅角部での磁束密度を 0 とした補正磁束密度を図 5-10 に, 一定区間を 30mm とした区間平均変化率を図 5-11 に示す. 図 5-10 より, 隅角部から 150~200mm 離れた位置にあるピークは破断より健全の方が大きくなることから, このピークの値(補正ピーク値)をピークの山の高さを評価する指標とした. 図 5-11 より, 磁束密度のグラフの傾きを表現した区間平均変化率については, 隅角部から 50mm 程度離れた位置で極大値, 320~350mm 程度離れた位置で極小値をとり, この間では健全の方がやや大きい値をとるが, 健全と破断を明確に分ける指標を採るのにめばしい箇所は鉄筋端部付近の影響があると考えられる隅角部から 800~1000mm の位置以外では見られなかった.

図 5-5, 図 5-9 から得られるピーク値, ピーク位置, 500 磁束密度と図 5-10 から得られる補正ピーク値を図 5-12 に示す. 図 5-12 の(a), (d)より, 破断の有無によりピーク値では 30 $\mu$ T, 補正ピーク値では 50 $\mu$ T の差が見られるが, 桁鉄筋の存在により値が 30 $\mu$ T ほど変動する. 一方, 図 5-12 の(b), (c)よりピーク位置, 500 磁束密度は桁鉄筋の影響が比較的小さい指標であり, 特に 500 磁束密度は環境磁場の影響を考慮しても十分な差が得られた.

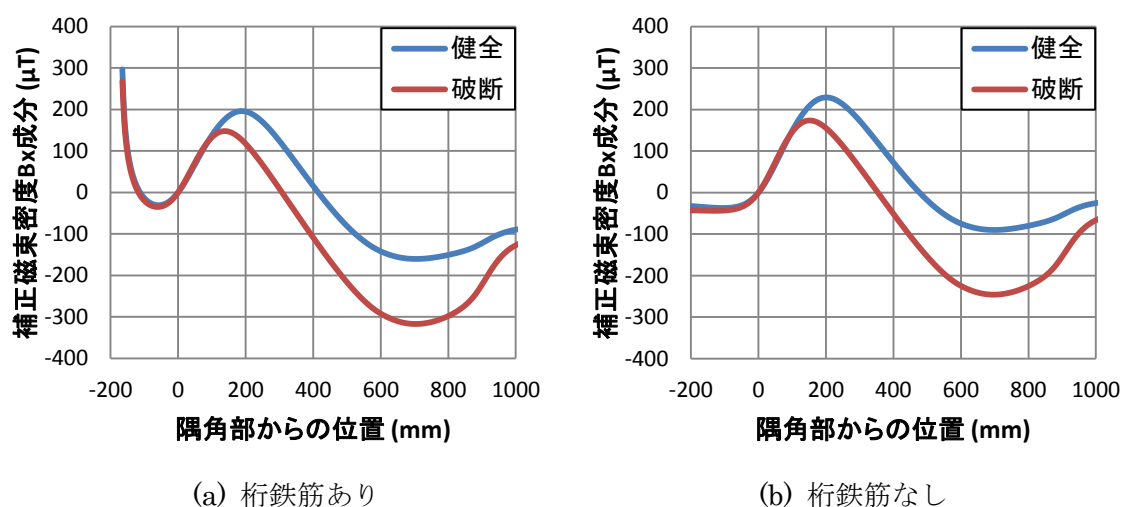
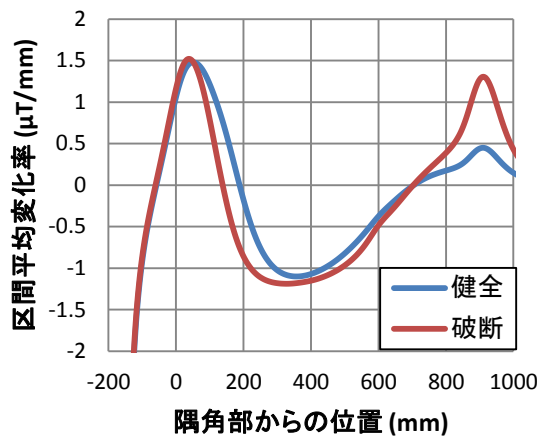
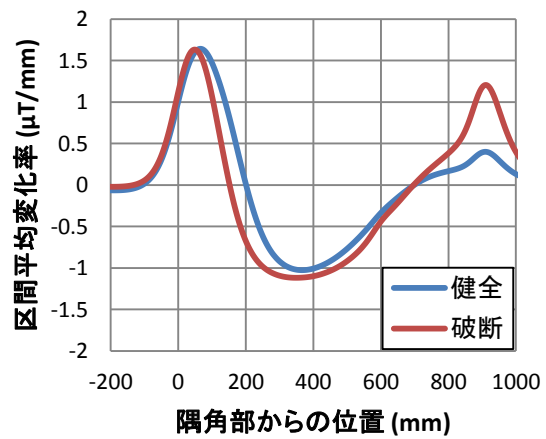


図 5-10 補正磁束密度  $B_x$  成分

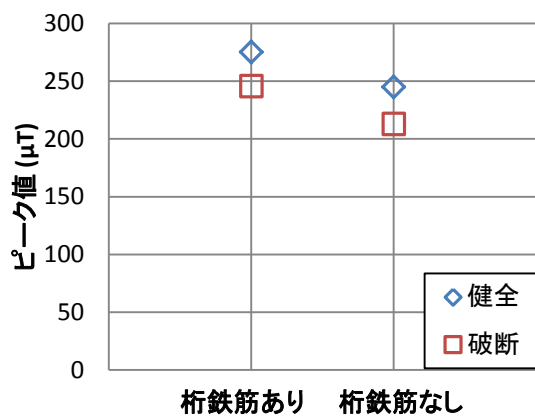


(a) 桁鉄筋あり

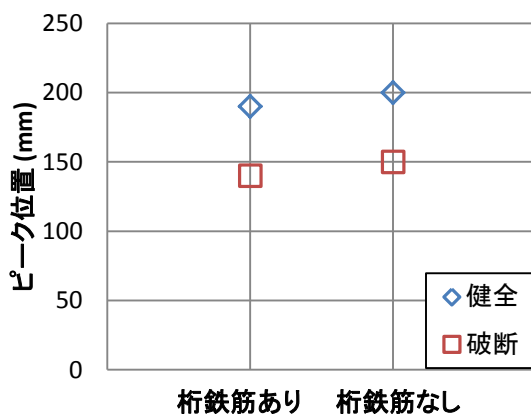


(b) 桁鉄筋なし

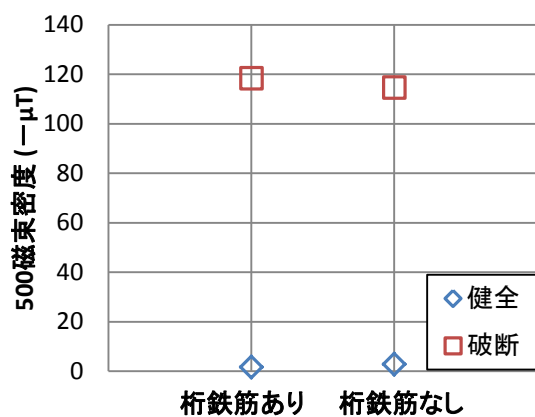
図 5-11 磁束密度 Bx 成分の区間平均変化率



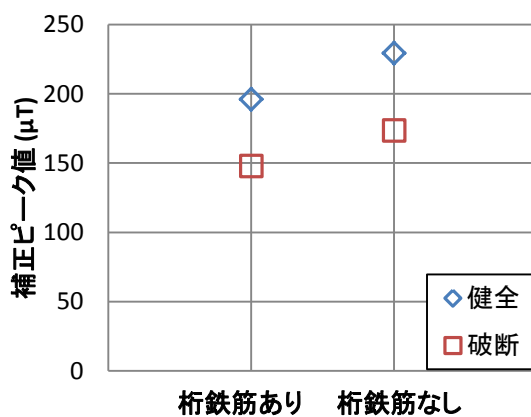
(a) ピーク値



(b) ピーク位置



(c) 500 磁束密度



(d) 補正ピーク値

図 5-12 各指標の桁鉄筋による影響

## 5.2 簡易な着磁方法による診断の影響要因

前節では解析の結果より，考案した簡易な着磁手法で健全と破断で帯磁状況に違いが生じることを明らかにし，破断の有無の差を評価するのに適切と考えられる指標をピックアップした．本節では実験により，簡易な着磁手法を用いた場合のスターラップのかぶり，鉄筋状態等の影響要因による磁束密度測定結果への影響を検討する．

### 5.2.1 実験概要

#### (1) パラメータおよび供試体概要

実験は第 3 章と同様に，写真 3-1 に示す木製の実験台にスターラップと主鉄筋を 1 本ずつ固定したものの供試体として使用した．鉄筋径はスターラップが D13，D16，D22 で，主鉄筋が D32 とした．鉄筋状態は健全，破断（ギャップ：2mm）に加え，曲げ加工部の内側から切れ目を施した亀裂状態，ギャップを 0mm で固定した接触状態をパラメータとした．スターラップのかぶりは 50～150mm の範囲で変化させた．

#### (2) 計測方法

図 5-13 に示すように  $x$ - $y$  座標をとり，スターラップの上面側のかぶり上縁と側面側の中心を原点とした．診断装置は片面診断と同じ磁石ユニットおよび磁気計測ユニット（写真 2-6）を用いた．

計測の手順については，まず磁石ユニットを（ $x = -150\text{mm}$ ， $y = -150\text{mm}$ ）の位置に磁石ユニットの N 面をあわせて設置し， $y = 700\text{mm}$  の位置までスライドさせ着磁を行った．着磁の位置に関しては付録 1 で検討を行っている．着磁終了後，磁気計測ユニットを用いてスターラップ直上で  $x = -150 \sim 700\text{mm}$  の範囲の磁束密度を計測した．

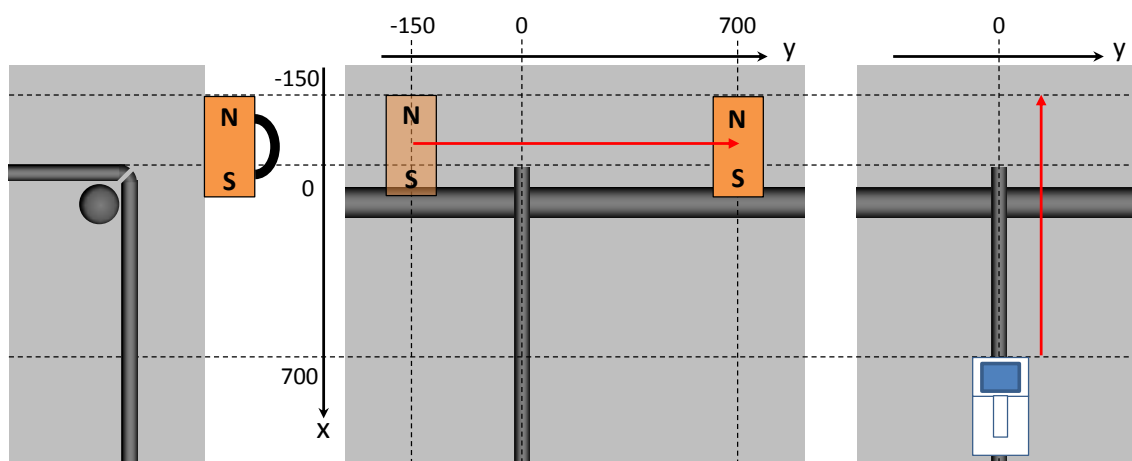


図 5-13 着磁および測定方法

## 5.2.2 測定鉄筋に関する影響要因

### (1) 測定結果および診断指標

磁束密度の測定結果の一例を図 5-14 に、測定結果を基にした補正磁束密度および一定区間を 30mm とした区間平均変化率を図 5-15 に示す. 図 5-14 より, 健全・破断ともに  $x = 100$  付近で上に凸の形状となり, 健全の場合はそのピークの山が高くなること, 隅角部から十分はなれた位置でグラフが負の方向に落ち込み, 破断の場合にその特徴が顕著であることから, 実験の測定結果からも解析結果と同様に磁束密度グラフの形状を評価する各指標が得られることを確認できる. また, 図 5-15 より補正ピーク値の他に, 区間平均変化率の極大値に健全と破断の差が見られた. この値も破断の有無を診断する指標として活用できることが予想されるが, 本研究では解析結果からも得られた指標であるピーク値, ピーク位置, 500 磁束密度, 補正ピーク値を用いて実験結果を整理するものとする.

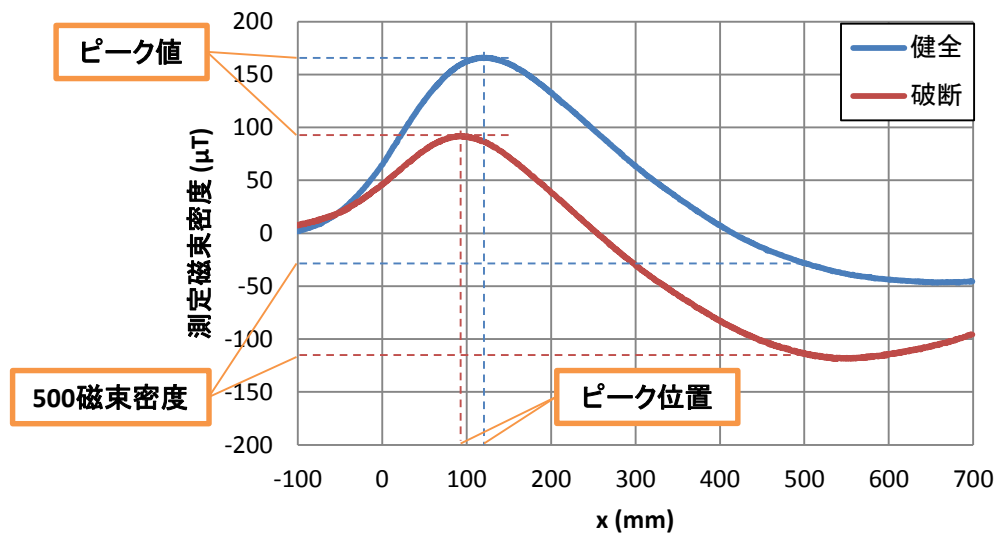


図 5-14 測定結果一例 (かぶり : 50mm)

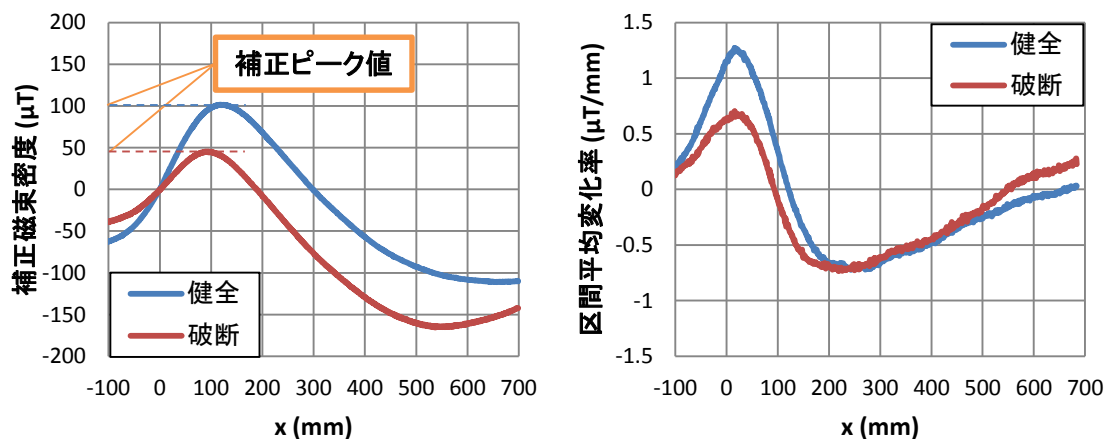


図 5-15 補正磁束密度および区間平均変化率 (かぶり : 50mm)

## (2) 鉄筋状態

スターラップの亀裂進展に伴う簡易着磁方法の指標の変化を検討する．実験要因の一覧を表 5-3 に示す．各 5 回ずつ行った測定結果から得られたピーク値，ピーク位置，500 磁束密度，補正ピーク値の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 5-16，図 5-17，図 5-18，図 5-19 に示す．

表 5-3 鉄筋状態に関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D16	50,100,150	健全 亀裂(25,50,75%) 接触(ギャップ:0mm) 破断(ギャップ:2mm)	各 5 回

図 5-16 より，どの鉄筋状態でもかぶりが大きくなるほどピーク値は小さくなり，また得られる指標の値の減少に伴いばらつきも小さくなる．一方，図 5-17 よりかぶりが大きくなるにつれてピーク位置も大きくなっている．各かぶりにおいて鉄筋状態に着目すると，健全から破断に近づくにつれピーク値は小さくなる傾向が見られ，特に接触・破断状態では健全との差が明確に表れた．

ピーク位置については，健全は接触・破断状態よりもわずかに大きくなる傾向が見られたが，値のばらつきが大きいこと，鉄筋状態間の差が小さいことから破断の有無を診断する指標としては適用が難しいと考えられる．

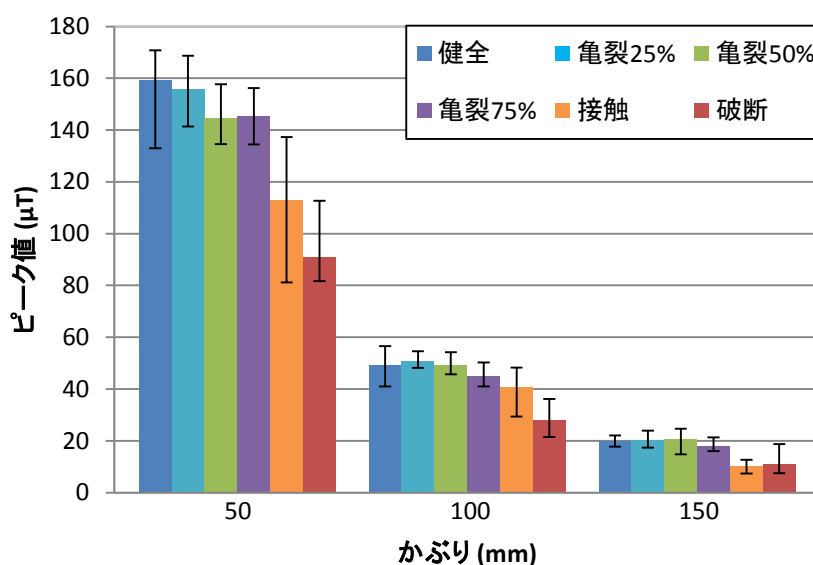


図 5-16 鉄筋状態とピーク値の関係

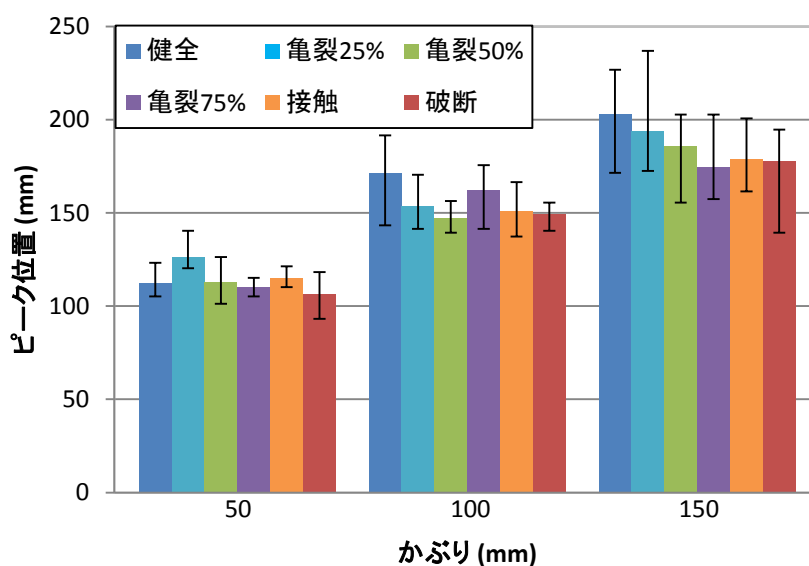


図 5-17 鉄筋状態とピーク位置の関係

図 5-18 より，500 磁束密度はかぶりが 50mm と小さい場合では，どの鉄筋状態でも負の値をとり，亀裂の進展に伴いその絶対値は大きくなる．かぶりが大きくなるほど値がマイナスからプラスに近づき，かぶり 100mm 以上では健全・亀裂鉄筋にプラスの値が見られるなど正負が逆転しているケースがあった．これはかぶりが大きくなるほどグラフが平坦になる特徴に加え，図 5-17 に示したようにかぶりの増大に伴いピーク位置が大きくなったことが原因だと考えられる．図 5-19 より，どのかぶりにおいても補正ピーク値は破断より健全のほうが大きくなる傾向にあるが，かぶりが 50mm と小さい場合では値のばらつきも大きくなり，接触・破断が健全の値を上回るケースも見られた．

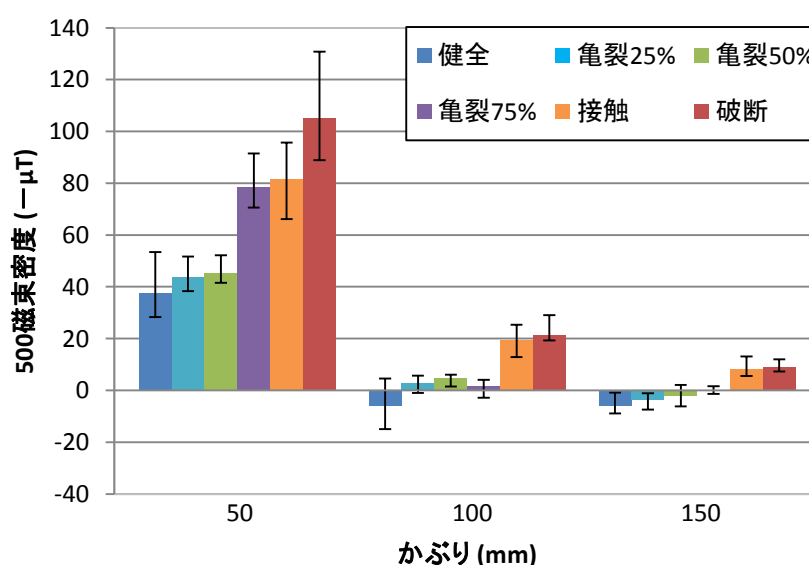


図 5-18 鉄筋状態と 500 磁束密度の関係

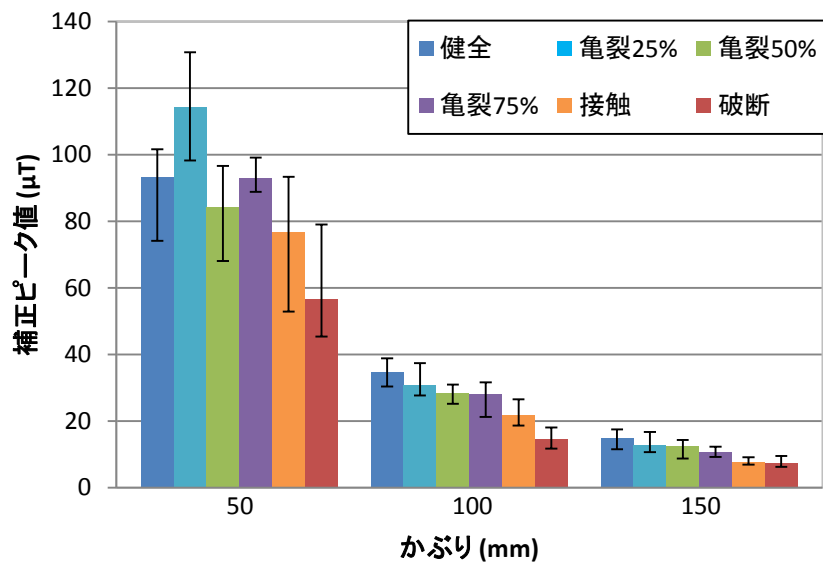


図 5-19 鉄筋状態と補正ピーク値の関係

### (3) かぶり

第 3 章の片面診断と同様に，着磁を行うかぶりと測定を行うかぶりを分けてその影響を検討する．表 5-4 に実験要因の一覧を示す．基準となる着磁・測定かぶりを 100mm とし，鉄筋状態は健全および接触として各 5 回ずつ行った．測定結果から得られたピーク値，ピーク位置，500 磁束密度，補正ピーク値の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 5-20，図 5-21，図 5-22，図 5-23 に示す．

表 5-4 かぶりに関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)		鉄筋状態	実験数
	着磁	測定		
D16	50	100	健全 接触(ギャップ:0mm)	各 5 回
	150			
	100	50		
		150		

図 5-20 より，着磁かぶり・測定かぶりが大きくなるほどピーク値は小さくなっている．図 3-8 に示した片面診断での着磁方法による着磁・測定かぶりとピーク値の関係と比較すると，測定かぶりにより値が影響を受けるという点は共通であるが，簡易な着磁方法の場合，着磁を行うかぶりの変化によってもピーク値は影響を受けている．これは，片面診断の場合，スターラップの長手方向に磁石を操作することにより，磁束密度測定箇所全域にわ

たり鉄筋が十分に帯磁されているのに対し、簡易な着磁では鉄筋の飽和磁化まで帯磁される範囲が隅角部周辺に限定されるためと考えられる。図 5-21 より、ピーク位置も着磁かぶり・測定かぶりの両方の影響を受けており、着磁かぶり・測定かぶりが大きくなるほどピーク位置は大きくなる傾向が見られた。

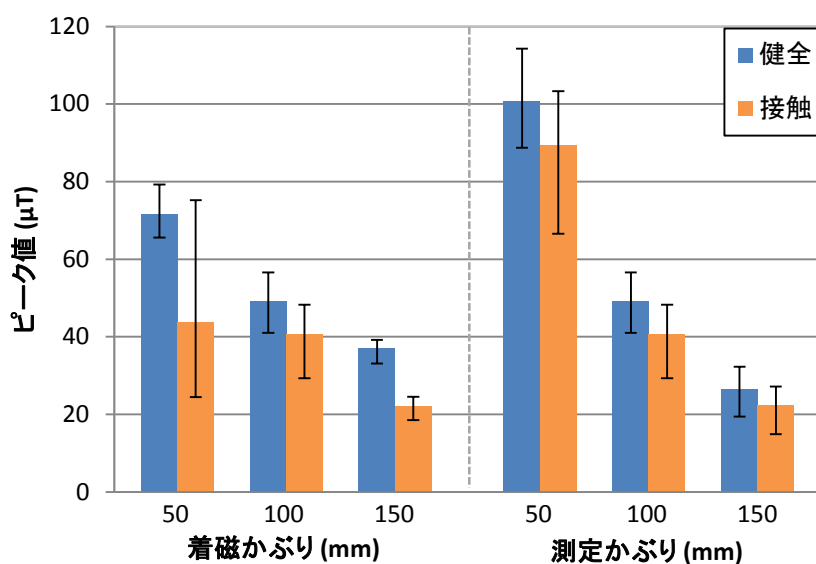


図 5-20 着磁・測定かぶりとピーク値の関係

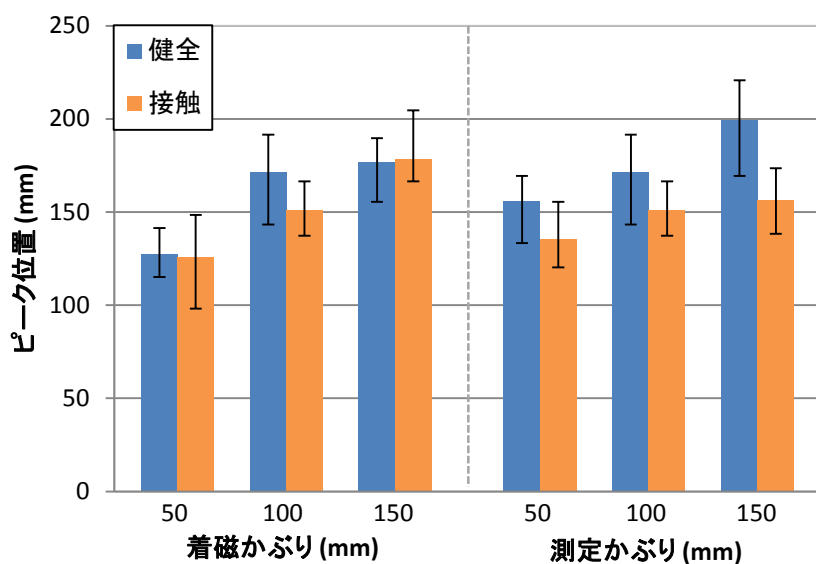


図 5-21 着磁・測定かぶりとピーク位置の関係



図 5-22 より，500 磁束密度の値は着磁かぶりが大きくなるほど健全・破断ともに大きくなり，測定かぶりが大きくなるほど健全・破断の絶対値が小さくなる．着磁・測定かぶりはともに 500 磁束密度に影響を与える要因となっているが，その影響の仕方は異なる．図 5-20 のピーク値の結果とあわせて考えると，着磁かぶりが大きくなると隅角部付近の N 極に起因するピーク値が小さくなり，隅角部から 500mm 離れた位置での磁束密度は正の方向に移動するのに対し，測定かぶりが大きくなると測定磁束密度のグラフ全体が平らになり，ピーク値・500 磁束密度は 0 に近づく方向に変化する．

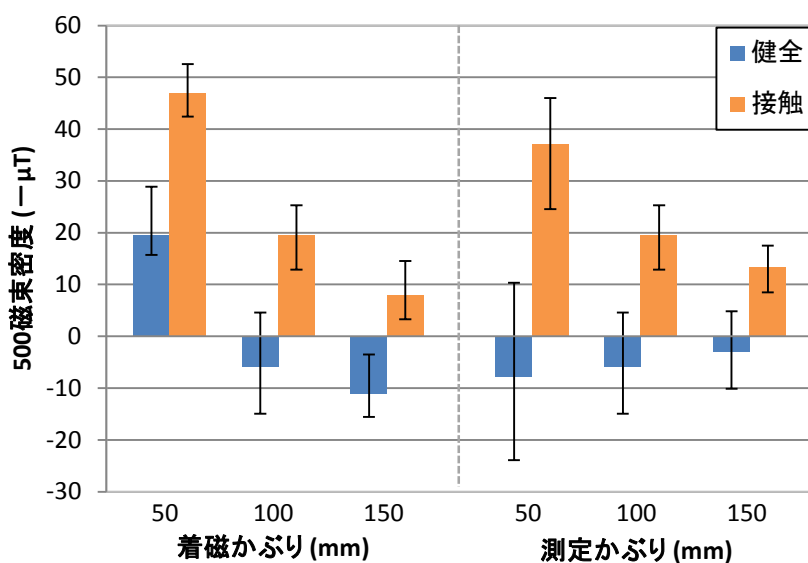


図 5-22 着磁・測定かぶりと 500 磁束密度の関係

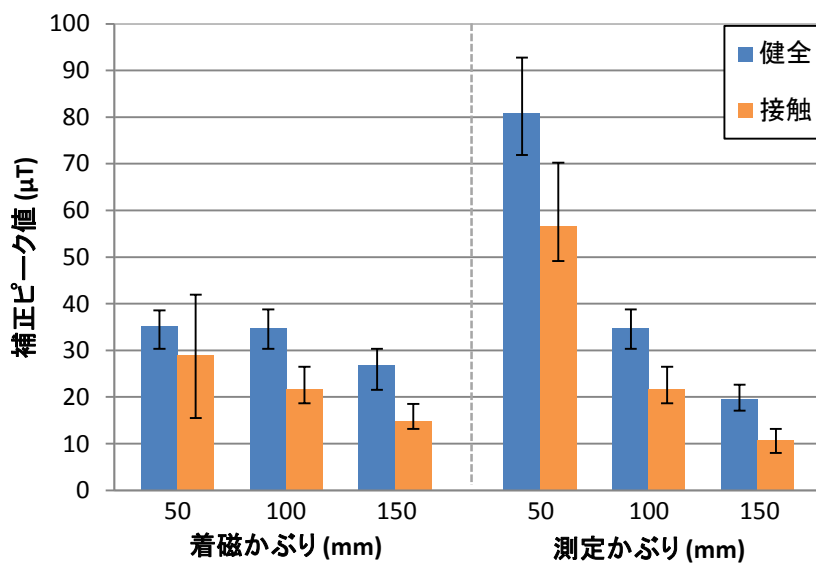


図 5-23 着磁・測定かぶりと補正ピーク値の関係

図 5-23 より，着磁かぶり・測定かぶりが大きくなるほど補正ピーク値は健全・破断ともに値が小さくなる傾向が見られるが，その変化の度合いは測定かぶりのほうが圧倒的に大きく，着磁かぶりの変化による補正ピーク値への影響は比較的小さいものとなっている．この理由としては，上記の着磁かぶりと測定かぶりによる磁束密度グラフの形状に与える影響の違いに加え，図 5-21 に示した着磁かぶりの増大に伴うピーク位置の変化の影響が考えられる．

#### (4) 鉄筋径

スターラップの鉄筋径の変化による指標への影響を検討する．表 5-5 に実験要因一覧を示す．ここでかぶりは 100mm，鉄筋径は健全・接触とし，各 5 回ずつ行った．測定結果から得られたピーク値，ピーク位置，500 磁束密度，補正ピーク値の平均値および最大値・最小値をそれぞれ図 5-24，図 5-25，図 5-26，図 5-27 に示す．

表 5-5 鉄筋径に関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D13	100	健全 接触(ギャップ:0mm)	各 5 回
D16			
D22			

図 5-24 より，鉄筋径が太くなるほど健全・接触ともにピーク値が小さくなる傾向が見られた．これはかぶり 100mm においては，鉄筋の体積が大きくなると隅角部に沿って磁石をスライドさせる簡易な着磁では十分に帯磁されていないためと考えられる．図 5-25 より，鉄筋径の違いによるピーク位置の変化はほとんど見られなかった．

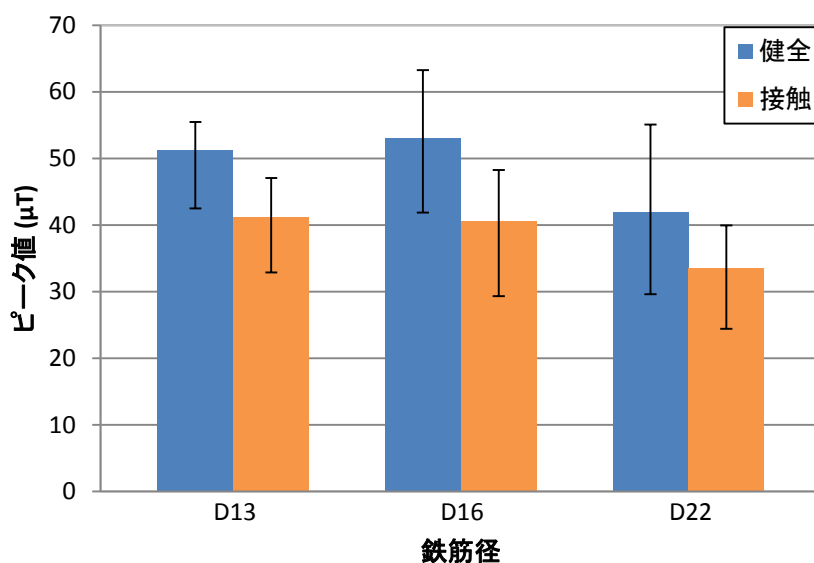


図 5-24 鉄筋径とピーク値の関係

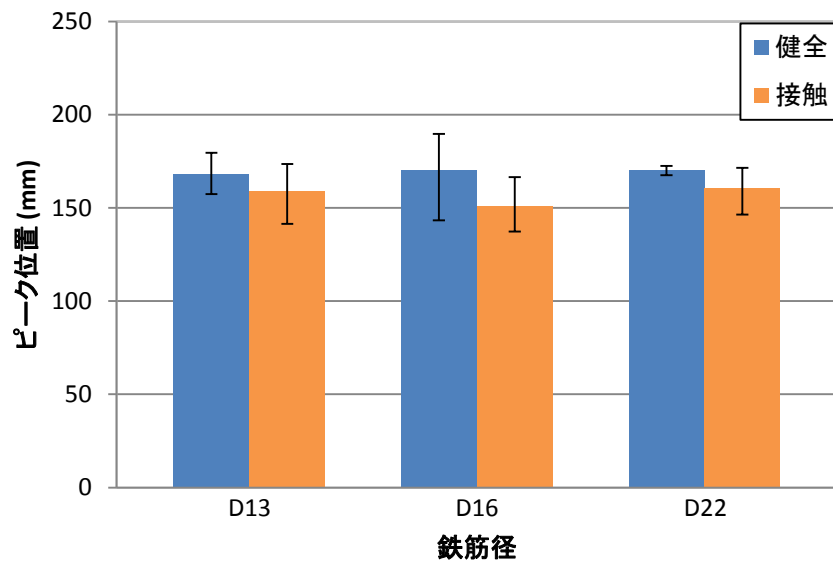


図 5-25 鉄筋径とピーク位置の関係

図 5-26 より、500 磁束密度は健全・接触ともに鉄筋径が太くなるほど値が大きくなる傾向が見られた。また、図 5-27 より、補正ピーク値についても鉄筋径の増大に伴い値が小さくなっている。どの鉄筋径でも健全と接触で指標の値に差は生じていることから、破断の有無の判定は可能であると考えられるが、その境界となる値は鉄筋径毎に変化することから、簡易な着磁方法を用いた診断を行う場合も片面診断と同様に、事前に測定する鉄筋の径を調査した上で鉄筋径毎の判断基準を適用する必要がある。

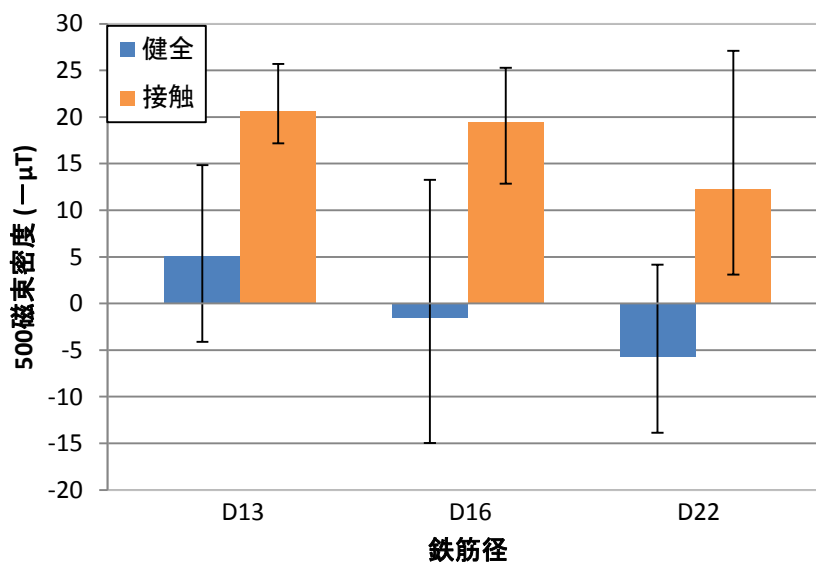


図 5-26 鉄筋径と 500 磁束密度の関係

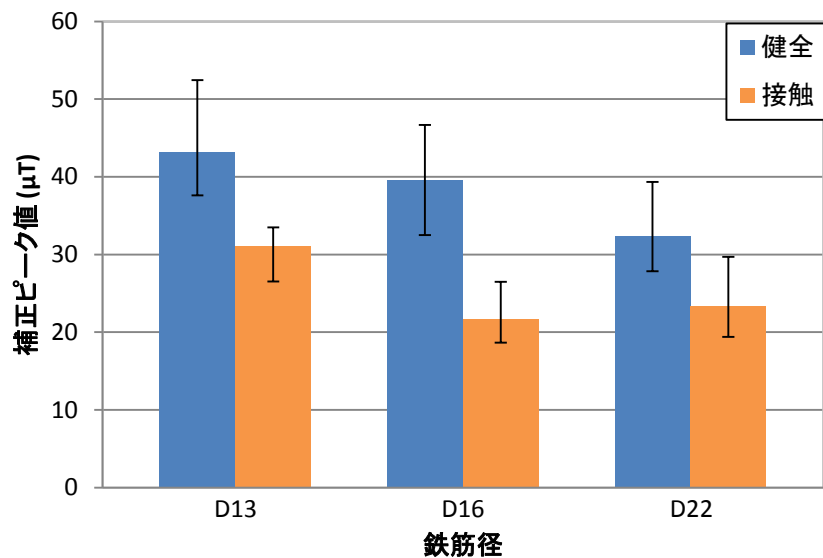


図 5-27 鉄筋径と最大変化率の関係

### 5.2.3 ばらつきを考慮した判断基準の作成

#### (1) 診断指標のヒストグラム

簡易な着磁方法に関する解析・実験の結果から 500 磁束密度，補正ピーク値を破断の有無を診断する指標として用いるものとし，この 2 つの診断指標のばらつきについて検討を行う．表 5-6 に実験要因の一覧を示す．ここで，かぶりは図 5-18，図 5-19 でばらつきの大きかった 50mm とした．測定結果から得られた診断指標の最小値，最大値，平均値を表 5-7 に，500 磁束密度および最大変化率のヒストグラムをそれぞれ図 5-28，図 5-29 に示す．ヒストグラムの区間の設定の仕方は第 3 章と同様とした．

表 5-6 ばらつきに関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D16	50	健全 亀裂(50%) 接触(ギャップ:0mm) 破断(ギャップ:2mm)	各 30 回

表 5-7 測定結果の最小値，最大値，平均値

診断指標	鉄筋状態	最小値	最大値	平均値
500 磁束密度 ( $\mu\text{T}$ )	健全	24.8	57.6	36.8
	亀裂	29.1	55.9	40.5
	接触	39.9	104.3	69.5
	破断	84.9	130.8	100.6
補正ピーク値 ( $\mu\text{T}$ )	健全	74.1	107.6	96.1
	亀裂	68.1	109.5	89.8
	接触	49.0	132.9	74.8
	破断	39.9	79.0	56.6

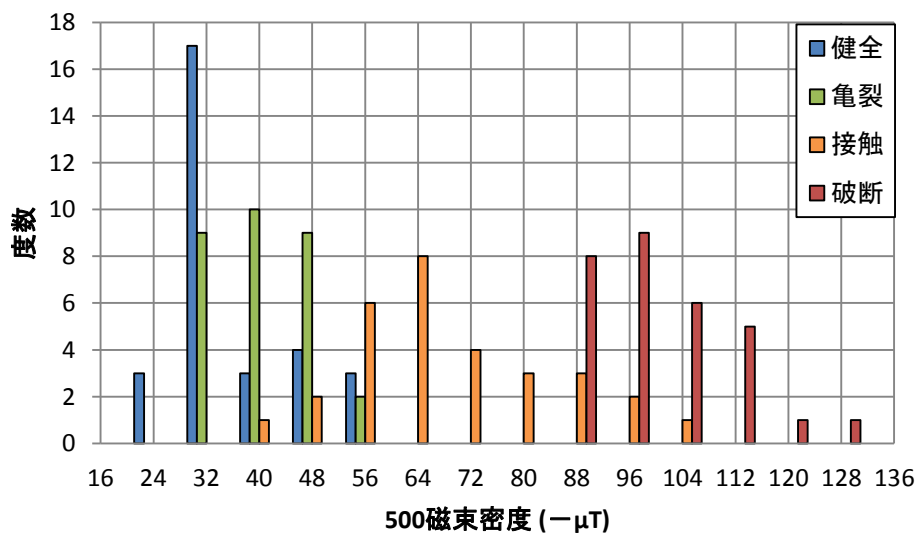


図 5-28 かぶり 50mm での 500 磁束密度のヒストグラム

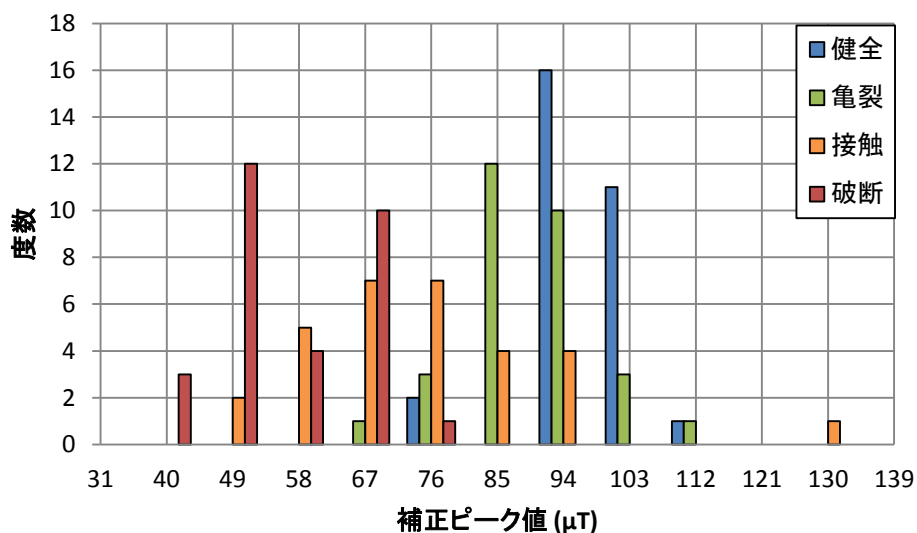


図 5-29 かぶり 50mm での補正ピーク値のヒストグラム

図 5-28 より，500 磁束密度では健全と破断の分布が明確に分かれている．接触状態についても，500 磁束密度－36～60 $\mu$ T の区間で測定結果の一部が健全と混同しているものの分布は概ね分かれていると言える．

図 5-29 より，補正ピーク値では健全と破断の分布は概ね分かれており，診断は可能であると考えられる．一方，接触状態はばらつきが大きく，健全の分布と重なる範囲も広くなるため，鉄筋状態の判断が難しくなる可能性が高い．

亀裂状態については，どちらの指標でも健全との分布とほぼ同じであることから，亀裂進展度 50%の状態の診断は困難との結果となった．

## (2) ばらつきの分布の検定

第 3 章の片面診断と同様に診断指標のばらつきを正規分布か対数正規分布で表現できるかどうかを確かめるためにコルモゴロフ＝スミルノフ検定を行った．ここで図 5-18, 図 5-22 より，500 磁束密度はかぶりによっては正負が逆転するケースが見られたため，正規分布のみを仮定した．図 5-28, 図 5-29 から得られる最大偏差統計量を表 5-8 に示す．表 5-8 より，各診断指標の最大偏差統計量はどの鉄筋状態でも  $n=30$  の有意水準 5%の棄却限界値よりも小さくなっていることから，帰無仮説は棄却されず，500 磁束密度は正規分布，補正ピーク値は正規分布・対数正規分布のどちらでも診断指標のばらつきを概ね評価できていることが確認できる．

表 5-8 コルモゴロフ＝スミルノフの適合度検定による最大偏差統計量

診断指標	仮定した分布	鉄筋状態				有意水準 5% 棄却限界値
		健全	亀裂	接触	破断	
500 磁束密度	正規分布	0.2198	0.0718	0.1454	0.1265	0.2417
補正ピーク値	正規分布	0.1047	0.1527	0.1322	0.1311	
	対数正規	0.1238	0.1532	0.0936	0.1006	

### (3) 片面診断との比較

片面診断の着磁（以下，通常着磁）と簡易な着磁方法（以下，簡易着磁）の各診断指標について，かぶり 50mm の条件での診断精度による比較を行う．比較には仮定した分布ごとに式(5.1)，式(5.2)で表される安全性指標  $\beta$  を用いて評価する．

$$\beta(ND) = \frac{|\mu - \mu_i|}{\sqrt{\sigma_i^2 + \sigma^2}} \quad (5.1)$$

$$\beta(LND) = \frac{|\lambda - \lambda_i|}{\sqrt{\zeta_i^2 + \zeta^2}} \quad (5.2)$$

ここに，

$\mu_i$  : 健全の診断指標の平均値

$\sigma_i$  : 健全の診断指標の標準偏差

$\mu$  : 健全以外の鉄筋状態の診断指標の平均値

$\sigma$  : 健全以外の鉄筋状態の診断指標の標準偏差

$\lambda_i$  : 健全の診断指標の対数平均値

$\zeta_i$  : 健全の診断指標の対数標準偏差

$\lambda$  : 健全以外の鉄筋状態の診断指標の対数平均値

$\zeta$  : 健全以外の鉄筋状態の診断指標の対数標準偏差

図 3-15，図 3-16，図 5-28，図 5-29 の診断指標の値から得られる安全性指標の値を表 5-9 に示す．片面診断の診断指標である補正ピーク値，最大変化率のばらつきは第 3 章の検討結果より対数正規分布を仮定した．

表 5-9 より，どの診断指標でも亀裂，接触，破断の順に安全性指標は大きくなり，健全状態の分布から離れることから鉄筋状態の診断は容易になる．亀裂状態については通常着磁，簡易着磁のどちらも安全性指標の値は低くなり，健全状態の分布との識別は困難である．接触・破断状態については通常着磁の方が安全性指標の値が大きく，補正ピーク値，最大変化率ともにギャップ 0mm と診断条件の厳しい接触状態でも安全性指標の値は誤判定確率が 2.275%となる 2 よりも大きくなっている．簡易着磁ではギャップ 2mm の破断状態の

場合のみ安全性指標の値が 2 よりも大きくなり, 十分な精度で診断が可能であると言える。また, 簡易着磁の補正ピーク値については対数正規分布より正規分布を仮定したほうが安全性指標の値が大きくなり, 判定が容易になることがわかる。

表 5-9 診断方法の安全性指標比較

着磁方法	診断指標	仮定した 分布	鉄筋状態		
			亀裂	接触	破断
通常着磁	補正ピーク値	対数正規	0.26	2.21	3.94
	最大変化率		0.48	4.17	5.90
簡易着磁	500 磁束密度	正規分布	0.33	1.81	4.74
	補正ピーク値		0.56	1.19	2.99
			対数正規	0.55	1.52

#### (4) 簡易着磁による破断の有無の判断基準

簡易着磁では健全と接触状態の分布の差が小さく診断はやや難しいという結果から, 健全, 接触 (ギャップ: 0mm), 破断 (ギャップ: 2mm) の測定値を用いた判断基準の検討を行う。表 5-5 の結果に加え, 健全, 接触, 破断状態についてかぶり 75, 100, 125, 150mm での実験を各 10 回行った。実験要因一覧を表 5-10 に示す。

表 5-10 判断基準に関する実験要因一覧

鉄筋径	かぶり(mm)	鉄筋状態	実験数
D16	50	健全	各 30 回
	75,100,	接触(ギャップ:0mm)	各 10 回
	125,150	破断(ギャップ:2mm)	

表 5-9 より 500 磁束密度, 補正ピーク値のばらつきの評価に正規分布を仮定し, 式(5.3), 式(5.4)で設定する健全, 接触, 破断の内 2 つの分布の安全性指標と境界値を表 5-11 に示す。

$$\beta(ND) = \frac{|\mu_1 - \mu_2|}{\sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}} \quad (5.3)$$

$$B(ND) = \frac{\sigma_1^2 \mu_r + \sigma_2^2 \mu_i}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (5.4)$$

ここに,



$\mu$  : 診断指標の平均値

$\sigma$  : 診断指標の標準偏差

表 5-11 診断指標の安全性指標および境界値

		鉄筋状態		かぶり(mm)				
				50	75	100	125	150
500 磁束密度	安全性指標	健全	接触	1.81	0.85	2.01	2.29	1.65
		健全	破断	4.74	2.75	3.28	3.11	1.89
		接触	破断	1.66	2.28	0.83	1.38	0.13
	境界値 ( $-\mu T$ )	健全	接触	44.6	26.9	6.7	3.9	-4.4
		健全	破断	64.1	44.7	16.9	6.9	-4.0
		接触	破断	91.4	44.5	20.0	7.4	3.9
補正ピーク値	安全性指標	健全	接触	1.19	2.62	1.75	1.88	2.00
		健全	破断	2.99	5.32	3.36	3.35	2.45
		接触	破断	0.91	0.97	1.32	1.32	0.36
	境界値 ( $\mu T$ )	健全	接触	92.8	53.9	31.9	20.3	10.5
		健全	破断	84.8	43.6	26.4	16.9	9.3
		接触	破断	62.3	36.4	20.7	15.4	8.14

簡易着磁による鉄筋状態の判断基準を作成するにあたり、まず第 3 章で行った通常着磁と同様に診断指標の値と境界値をかぶりごとにまとめる。測定結果から得られた 500 磁束密度と健全・接触、健全・破断の境界値を図 5-30 に、補正ピーク値と健全・接触、健全・破断の境界値を図 5-31 に示す。ここで、各かぶりにおいて境界値よりも診断指標の値が大きければ「破断なし」、小さければ「破断あり」と判定すると、図 5-26、図 5-27 より各鉄筋状態の誤診断数は表 5-12 に示すようになる。

判断基準を健全・接触の境界値と設定すると、破断状態は全て正しく判定されるが、健全鉄筋については 500 磁束密度で 70 回中 11 回、補正ピーク値で 70 回中 8 回「破断あり」と誤診断された。健全・破断の境界値を判断基準と設定することで、健全および破断状態は概ね正しく判定されていることから、測定鉄筋のかぶりが既知である場合、かぶり 50～150mm の範囲で健全とギャップ 2mm 以上の破断をそれぞれの指標で診断することができると考えられる。

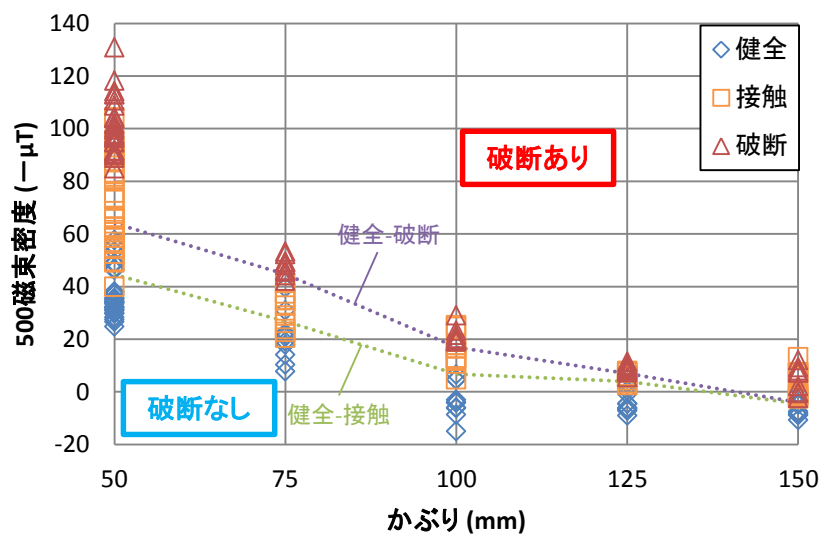


図 5-30 500 磁束密度による破断の有無の判断基準

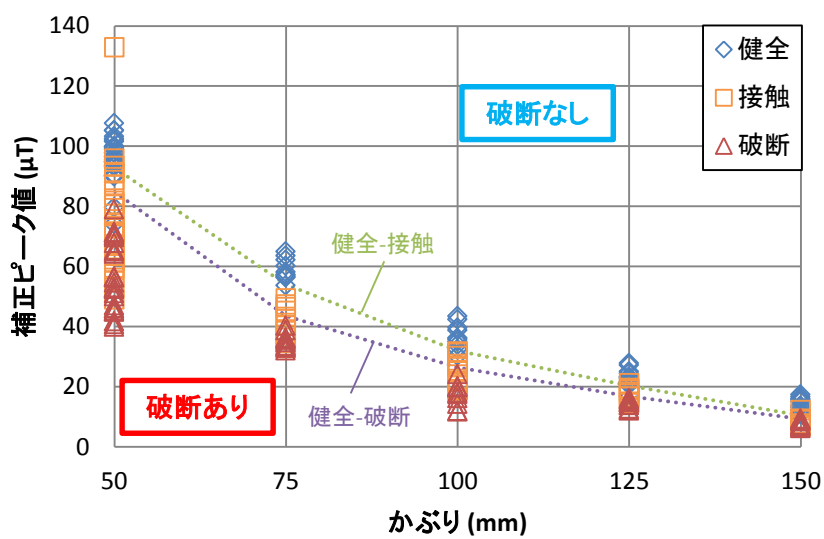


図 5-31 補正ピーク値による破断の有無の判断基準

表 5-12 診断指標ごとの誤診断数

診断指標	判断基準	鉄筋状態	かぶり(mm)					誤診断数
			50	75	100	125	150	
500 磁束密度	健全-接触	健全	7/30	2/10	0/10	0/10	2/10	11/70
		接触	1/30	4/10	1/10	2/10	0/10	8/70
		破断	0/30	0/10	0/10	0/10	0/10	0/70
	健全-破断	健全	0/30	0/10	0/10	0/10	1/10	1/70
		接触	13/30	10/10	7/10	7/10	0/10	37/70
		破断	0/30	2/10	0/10	1/10	0/10	3/70
補正ピーク値	健全-接触	健全	6/30	1/10	1/10	0/10	0/10	8/70
		接触	3/30	0/10	0/10	1/10	1/10	5/70
		破断	0/30	0/10	0/10	0/10	0/10	0/70
	健全-破断	健全	2/30	0/10	0/10	0/10	0/10	2/70
		接触	7/30	4/10	6/10	6/10	2/10	25/70
		破断	0/30	0/10	0/10	0/10	1/10	1/70

次に 500 磁束密度、補正ピーク値の 2 つの指標を組み合わせて鉄筋状態を評価することを考える。図 5-31 の補正ピーク値を x 軸に、図 5-30 の 500 磁束密度を y 軸にプロットすると、各鉄筋状態は図 5-32 に示すような分布となった。

図 5-28 より、2 つの指標を組み合わせることにかぶりの値に関わらず健全、接触、破断の測定結果が分かれた。これは図 5-30、図 5-31 の診断指標の絶対値に着目すると、健全状態より接触・破断状態の方が 500 磁束密度では大きく、補正ピーク値では小さくなり、どちらの指標もかぶりが大きくなるにつれて値が 0 に近づくという特性をもつためである。

表 5-11 より、かぶり 50～150mm までの健全・接触の境界値と接触・破断の境界値を線形近似した境界線を用いて、健全・接触境界線より小さい領域を「領域Ⅰ」、接触・破断境界線を線形近似した式より大きい領域を「領域Ⅲ」、健全・接触境界線より大きく接触・破断境界線より小さい領域を「領域Ⅱ」とすると、簡易な着磁による磁束密度の測定結果は表 5-13 に示すように 3 つの領域に分類される。表 5-12 より、健全鉄筋の 90%、接触鉄筋の 80%、破断鉄筋の 80%はそれぞれ領域Ⅰ、Ⅱ、Ⅲに分布していることから、簡易着磁を用いて領域Ⅰを「破断なし」、領域Ⅲを「破断あり」と判定するスクリーニングを行い、領域Ⅱに分類された鉄筋については再度通常着磁を行うことで診断の信頼性を損なうことなく漏洩磁束法片面診断にかかる手間を省くことができると考えられる。

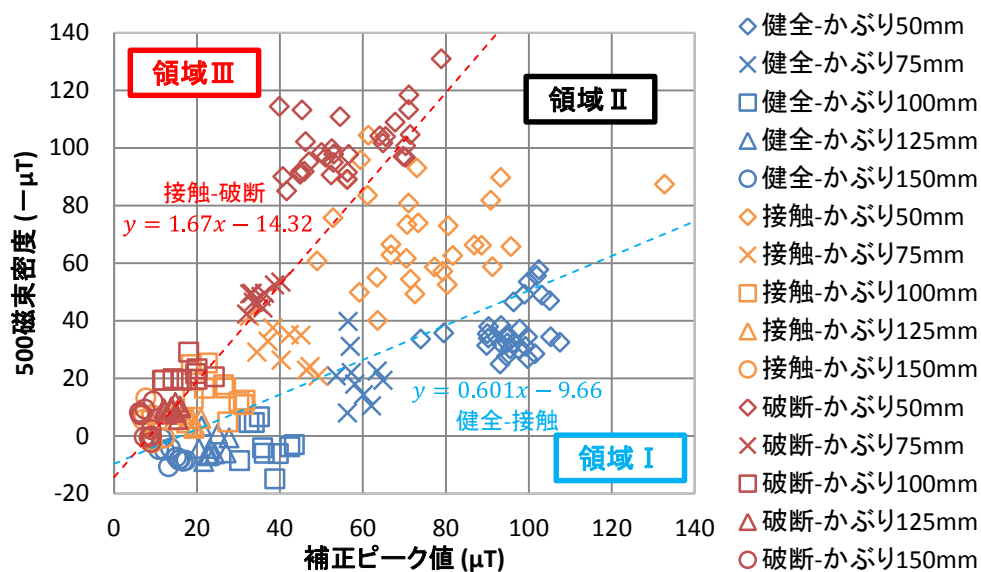


図 5-32 2つの診断指標を用いた鉄筋状態のスクリーニング

表 5-13 簡易着磁によるスクリーニング結果

	鉄筋状態	かぶり(mm)					合計
		50	75	100	125	150	
領域 I	健全	27/30	8/10	10/10	9/10	9/10	63/70
	接触	0/30	0/10	1/10	0/10	1/10	2/70
	破断	0/30	0/10	0/10	0/10	0/10	0/70
領域 II	健全	3/30	2/10	0/10	1/10	1/10	7/70
	接触	26/30	9/10	7/10	10/10	4/10	56/70
	破断	4/30	1/10	1/10	5/10	3/10	14/70
領域 III	健全	0/30	0/10	0/10	0/10	0/10	0/70
	接触	4/30	1/10	2/10	0/10	5/10	12/70
	破断	26/30	9/10	9/10	5/10	7/10	56/70

#### 5.2.4 連続した着磁の影響

前項の結果より，簡易着磁を用いたスクリーニングを行った後に片面診断を行う，より効率的な鉄筋破断診断の手順の可能性が示された．ここで，実験では鉄筋の消磁を行った後に各着磁操作および磁束密度の測定を行ったが，現場ではコンクリートの存在により実験と同様の消磁を行うことは難しく，着磁を行う前の帯磁状況は異なるものと考えられる．そこで，通常着磁と簡易着磁に関してどちらか一方のみを行った場合と2つを連続して行った場合の測定磁束密度のグラフを比較し，鉄筋破断検出に用いる診断指標が得られるかどうかを検討する．

表 5-13 に実験要因一覧を示す．通常着磁の着磁範囲は第 3 章と同様とした．

表 5-13 連続した着磁の影響に関する実験要因一覧

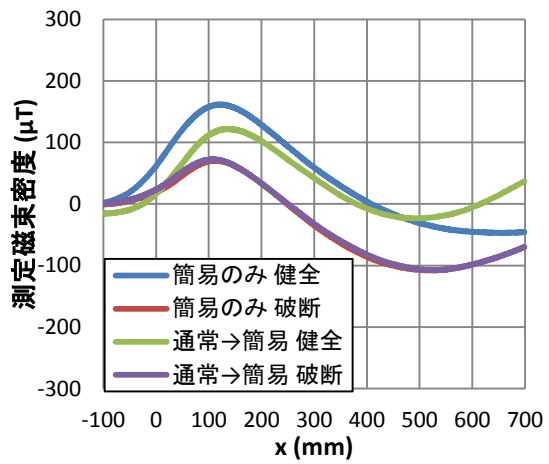
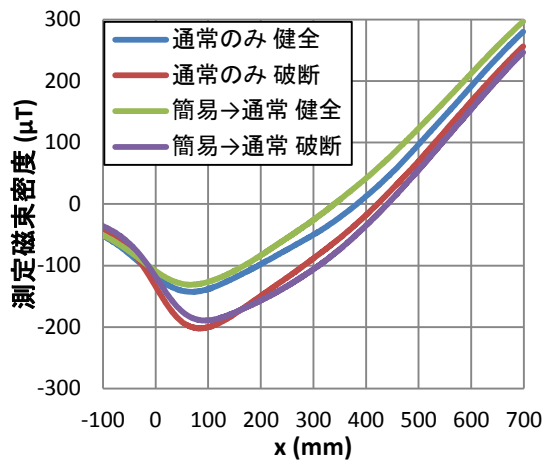
鉄筋径	かぶり(mm)	着磁方法	鉄筋状態	実験数
D16	50,100,150	通常	健全 破断(ギャップ:2mm)	各 2 回
		簡易		
		通常後, 簡易		
		簡易後, 通常		

図 5-29 にかぶりごとの実験結果を示す．測定磁束密度のグラフは着磁方法ごとに2回ずつ行った測定結果を平均したものである．

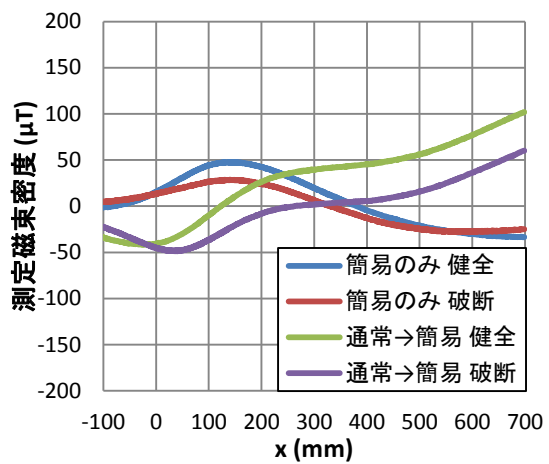
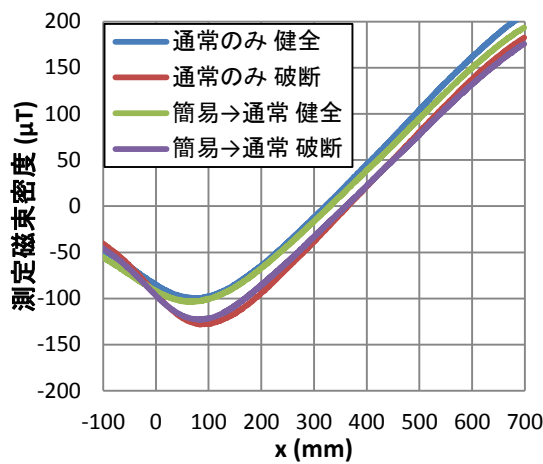
通常着磁については，50，100，150mm のどのかぶりにおいても簡易着磁を前に行うことによる測定磁束密度グラフの変化はほぼ見られず，同様に診断指標が得られることが確認できる．これは測定鉄筋長手方向に磁石を動かしたことで，磁束密度測定範囲全域にわたって鉄筋を磁化し，簡易着磁による帯磁状況が完全に上書きされたためと考えられる．

一方，簡易着磁については，かぶりが 50mm と小さい場合では通常着磁後でも同様に補正ピーク値および 500 磁束密度が得られるが，かぶりが 100mm 以上の場合では事前に通常着磁を行うことで隅角部から 100～200mm 程度離れた位置に表れる上に凸のピークが見られないなどグラフ形状の明らかな変化が見られ，診断指標が得られないという結果となった．簡易着磁は隅角部に磁石を置きスライドさせる着磁方法であるため，隅角部から離れた位置についてはかぶりが大きくなるほど十分に磁化されないことから，簡易着磁前に行った通常着磁の帯磁状況が残ったものと考えられる．

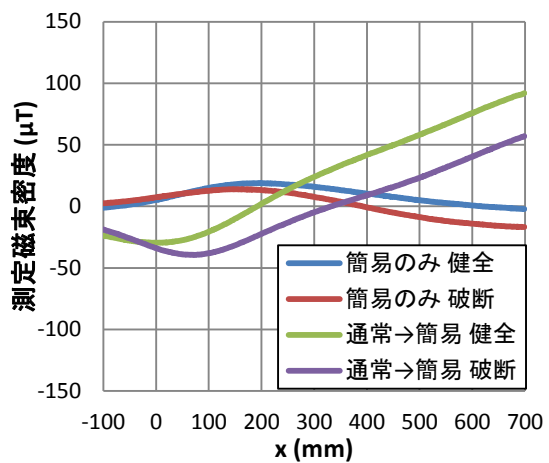
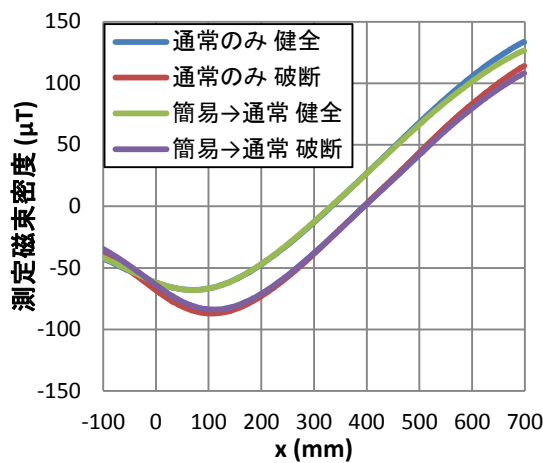
以上より，片面診断はスクリーニング後でも同様に行うことができるが，簡易着磁によるスクリーニングを行う前に測定鉄筋群の何本か選び，強く磁化されていないかを確認するなどの対応が必要であると考えられる．



(a) かぶり : 50mm



(b) かぶり : 100mm



(c) かぶり : 150mm

図 5-33 連続した着磁による測定磁束密度の変化

## 第 6 章 漏洩磁束法による鉄筋破断診断フローの提案

### 6.1 本論文で提案した手法の総括

本論文では漏洩磁束法の原理を利用したコンクリート隅角部の片面からの鉄筋破断の診断手法の提案および適用性の検討を行った。漏洩磁束法による鉄筋健全度調査の適用手順の提案にあたり、本節では本論文より得られた知見の取りまとめを行う。提案する片面診断手法ごとの診断指標の特徴を表 6-1 に示す。以下、各要因について説明を加える。

#### (1) 診断手法

片面診断で行う通常着磁は永久磁石を測定鉄筋曲げ加工部上方から測定鉄筋長手方向に 1 本ずつ往復し着磁させる方法で、両面診断と同様に破断箇所に磁極が集中する影響を補正ピーク値、最大変化率の 2 つの指標を用いて捉えることにより破断の有無を診断する。スクリーニングで行う簡易着磁はスターラップ曲げ加工部に磁石を設置し、主鉄筋に沿う方向にスライドさせ着磁を行う方法で、健全では測定面である側面側の隅角部付近と上面側に磁極のペアが生じ、破断では側面側の隅角部との端部側に磁極のペアが生じる、という帯磁状況の違いから 500 磁束密度、補正ピーク値の 2 つの指標で破断診断を行う。

#### (2) 残留磁化

通常着磁では磁束密度測定範囲の全域に対し着磁が行われるため、診断前の鉄筋の帯磁状況による影響はない。簡易着磁では着磁範囲が曲げ加工部周辺に限定されるため、以前に漏洩磁束法を適用した等の理由による強い残留磁化ある場合、診断指標は影響を受ける。

#### (3) 鉄筋状態

スターラップの状態に関しては、通常着磁・簡易着磁ともに亀裂が曲げ加工部内側から 50%程度進んだ場合では健全との差は小さく、区別が難しい。鉄筋が完全に切れている場合、通常着磁では破断ギャップ 0mm でも健全との間に明確な差が生じ、ギャップが大きくなるほど健全との区別が行いやすくなる。簡易着磁ではギャップ 2mm 以上で健全鉄筋との明確な差が生じた。

#### (4) かぶり

かぶりが大きくなるほど測定磁束密度のグラフは平らになり、健全と破断で診断指標の差が小さくなる。本論文ではかぶり 50～150mm の範囲で破断の有無に対し診断指標の差が見られた。ここで、かぶりが 50mm よりも小さい場合は着磁および磁束密度を測定するかぶりを上記の範囲に調整することで診断が可能であると考えられるため、適用可能なかぶりは 150mm 以下となる。

#### (5) 鉄筋径

測定鉄筋の径によりスクリーニング、片面診断の測定磁束密度のグラフ形状は異なり、診断指標の値は影響を受けるため、診断鉄筋の径をあらかじめ知っておく必要がある。

#### (6) 配筋ピッチ

配筋のピッチが小さくなるほど健全と破断の差が小さくなり診断が困難となる。片面診

断では補正ピーク値はピッチが 100mm 以上, 最大変化率はピッチが 200mm 以上の条件で適用が可能と考えられる。スクリーニング手法のピッチの影響は未検討であり, 今後適用条件を明らかにする必要がある。

#### (7) 環境磁場および桁鉄筋の影響

地磁気等の環境磁場の影響は 1 つの測定磁束密度のグラフ内で差分をとることでキャンセルする。簡易着磁の 500 磁束密度は指標の特性上, 地磁気の影響を受け得るため, 基準となる地磁気の値を得ておく必要がある。また, 桁内部の鉄筋など上部工部分に存在する磁性体の影響により簡易着磁の補正ピーク値は影響を受けるため, 診断を行う隅角部から桁鉄筋までの距離が十分離れているかを確認する必要がある。

#### (8) 鉄筋状態の判定

片面診断では 50～150mm までの各かぶりにおいて健全と破断ギャップ 0mm の接触状態の分布から得られた判断基準を用いて「破断なし」, 「破断あり」の判定を指標ごとに行い, 2 つの指標により総合的な評価を行う。スクリーニングでは 2 つの指標を X-Y 座標にプロットし, 「領域Ⅰ：破断なし」, 「領域Ⅱ」, 「領域Ⅲ：破断あり」の区別を行う。

実際の構造物における診断では, 事前の鉄筋探査で検知できなかった配筋等の影響により正しい診断指標の値を得られないことがあるため, 測定磁束密度のグラフ形状に問題がないか確認を行う必要がある。

表 6-1 本論文で提案した診断手法の特徴

	片面診断		スクリーニング	
着磁方法	曲げ加工部の上方から 測定鉄筋長手方向に着磁		曲げ加工部に磁石を設置し 主鉄筋方向にスライドさせ着磁	
測定方法	測定鉄筋直上の長手方向		測定鉄筋直上の長手方向	
判定方法	かぶりごとに「破断なし」, 「破断あり」の判定を行い, 2 つの指標による総合的な鉄筋状態の評価を行う		2 つの指標の組合せにより「領域Ⅰ：破断なし」, 「領域Ⅱ」, 「領域Ⅲ：破断あり」と鉄筋状態を区別する	
残留磁化の影響	なし		あり	
診断指標	補正ピーク値	最大変化率	500 磁束密度	補正ピーク値
適用可能なかぶり	50～150mm	50～150mm	50～150mm	50～150mm
鉄筋径の影響	あり	あり	あり	あり
適用可能なピッチ	100mm 以上	200mm 以上	—	—
環境磁場の影響	なし	なし	あり	なし
桁鉄筋の影響	ほぼなし	ほぼなし	ほぼなし	あり

※—は未検討の項目



## 6.2 ASR 劣化構造物の維持管理に関する提言

本節では ASR により劣化したコンクリート構造物の維持管理の手順を整理した上で、漏洩磁束法による鉄筋健全度調査の適用手順について検討する。

### 6.2.1 現行の維持管理フロー

ASR の劣化過程は潜伏期、進展期、加速期、劣化期の 4 段階にグレーディングされており、その変状は表 6-2 に示すように、まず進展期においてひび割れ、変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる<sup>1)</sup>。コンクリートは脆性材料であり、鉄筋コンクリート構造物のひび割れの発生を完全に防止することは難しいと考えられる。しかし、コンクリートのひび割れはすべてが問題というわけではなく、構造物にもたらす障害によって有害なものと無害なものに区別される。コンクリートのひび割れは打ち込みから数年の間にひび割れの進行が収束すると考えられる初期ひび割れ、中性化や塩害による腐食ひび割れのような進行性のひび割れ、荷重により発生するひび割れに分類され、その原因が推定でき、劣化機構が中性化、塩害、凍害、化学的侵食、ASR、疲労のいずれかに該当する場合はその劣化機構に応じた維持管理を行うものとしている<sup>2)</sup>。

ASR による変状が確認された橋脚の維持管理フローの例として、国土交通省道路局による道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)<sup>3)</sup>と阪神高速道路株式会社の ASR 構造物の維持管理マニュアルに示されている対策フロー<sup>4)</sup>をそれぞれ図 6-1、図 6-2 に示す。どちらのフローも日常点検・定期点検においてひび割れを発見し、その原因が ASR であると判定されるところから始まる。ここで点検の種類については、維持管理開始時点での構造物の性能に関する初期状態を把握することを目的とした初期点検、巡回で点検が可能な範囲について、劣化、損傷の有無や程度の把握を目的とした日常点検、日常点検では把握できないような構造物全体の劣化、損傷の有無やその程度をより詳細に把握することを目的とした定期点検があり、必要に応じて臨時点検や緊急点検を行うとしている。点検の頻度は日常点検では構造物の重要度、第三者影響度、劣化予想結果、維持管理限界等を考慮し、実際に調査を行う人員や予算の規模等を勘案して適切に定めるとしており、定期点検では数年に 1 回が一般的な目安とされている<sup>2)</sup>。

表 6-2 構造物の外観上のグレードと劣化の状態<sup>1)</sup>

構造物の外観上のグレード	劣化の状態
状態Ⅰ (潜伏期)	ASRによる膨張およびそれに伴うひび割れがまだ発生せず、外観上の変状が見られない。
状態Ⅱ (進展期)	水分とアルカリの供給下において膨張が継続的に進行し、ひび割れが発生し、変色、アルカリシリカゲルの滲出が見られる。しかし、鋼材腐食による錆汁は見られない。
状態Ⅲ (加速期)	ASRによる膨張速度が最大を示す段階で、ひび割れが進展し、ひび割れの幅および密度が増大する。また、鋼材腐食による錆汁が見られる場合もある。
状態Ⅳ (劣化期)	ひび割れの幅および密度がさらに増大し、段差、ずれや、かぶりの部分的な剥離・剥落が発生する。鋼材腐食が進行し錆汁が見られる。外力の影響によるひび割れや鋼材の損傷が見られる場合もある。変位・変形が大きくなる。

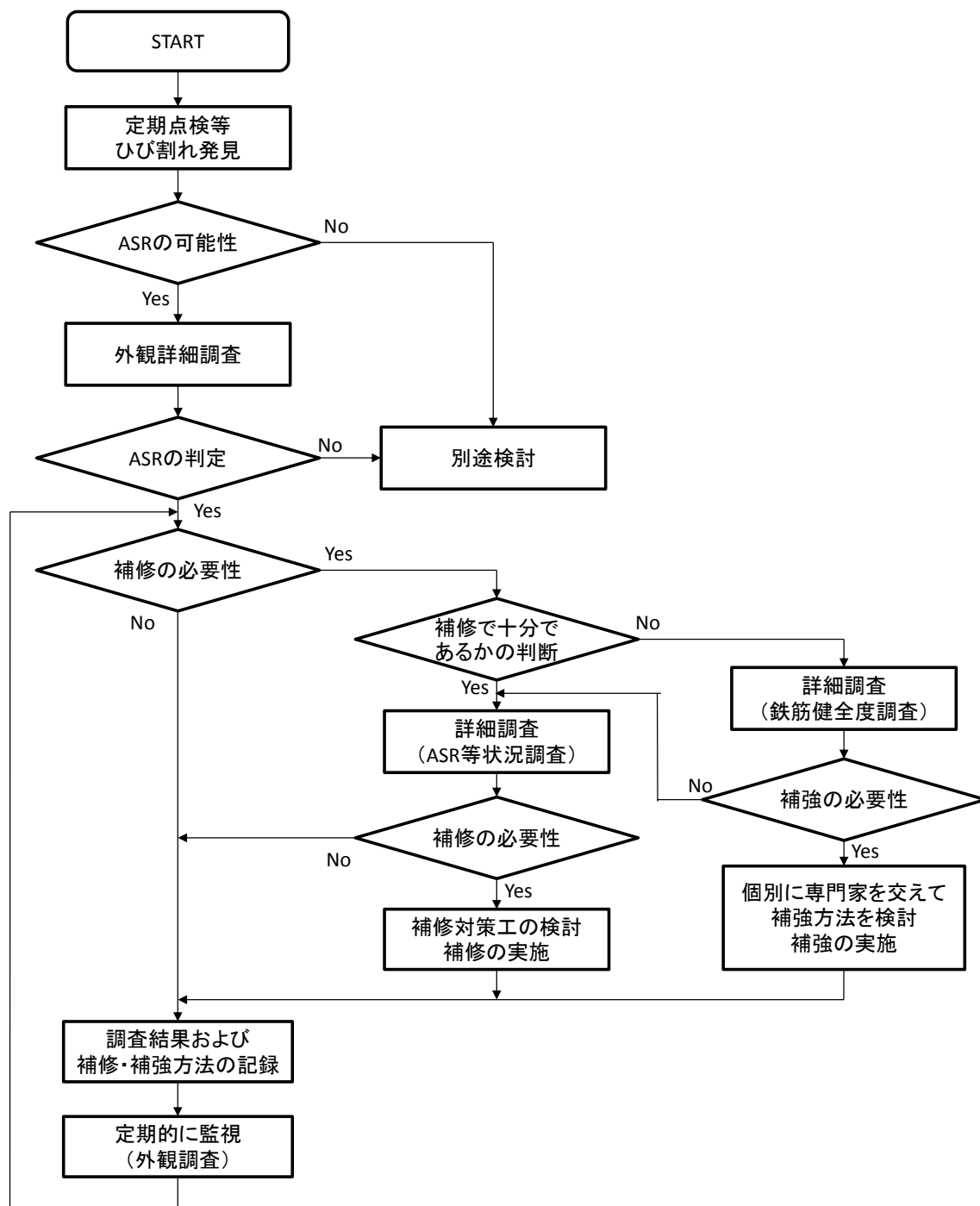


図 6-1 国土交通省道路局「道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領(案)」の ASR による変状を生じた橋梁に対する対応フロー<sup>3)</sup>

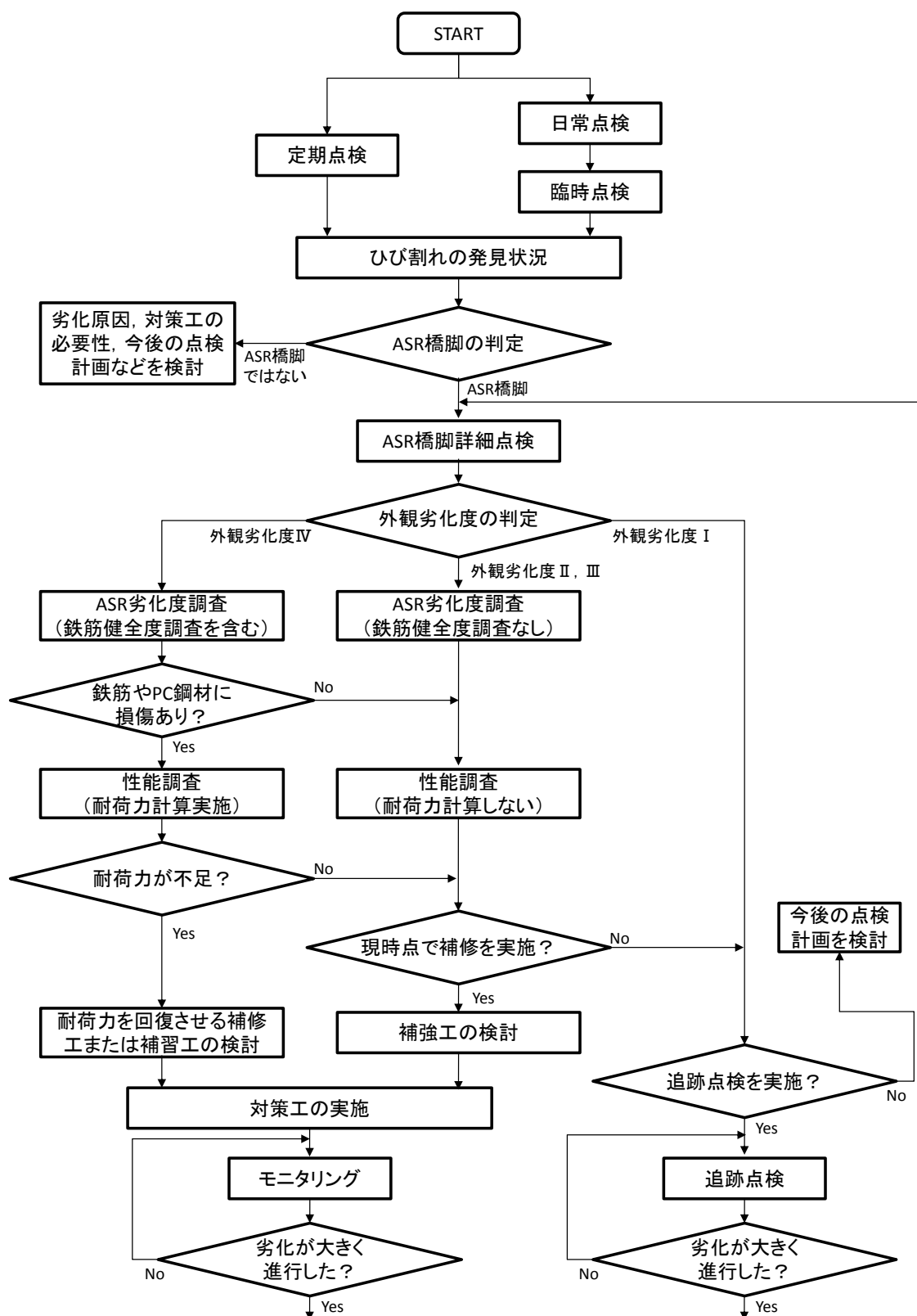


図 6-2 阪神高速道路株式会社「ASR 構造物の維持管理マニュアル」の ASR の橋脚の維持管理フロー4)

図 6-1 の対策フローについて、より詳しい解説がされている「アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン (案)」<sup>5)</sup>によると、「コンクリート表面の網目状のひび割れ」、「主鉄筋や PC 鋼材の方向に沿ったひび割れ」、「微細なひび割れ等における白色のゲル状物質の析出」の 3 つのポイントの内、いずれか 1 点でも明確に ASR と見られる性状を示していれば ASR によるものと判定し、以下に示す項目の内 1 点でも該当しない場合は補修の必要性について検討を行うとしている。

1. ASR によるひび割れが生じていても、ひび割れ幅が小さく、それらが反応ゲルや炭酸カルシウムなどで充填されている場合
2. コンクリートに浮きや剥離が見られない場合
3. 過去に ASR に対する補修を行った箇所に、外観上の変化が認められない場合
4. 経過観察中であって、ひび割れなどの ASR による変状が進行していないと判断される場合

補修が必要だと判断された場合、鉄筋の破断、鉄筋とコンクリートとの付着、鉄筋の腐食等を総合的に勘案し、補強が必要か否かの評価を行うとしており、ここで以下に示すいずれかの変状が見られる構造物に対して鉄筋健全度調査に関する詳細調査を行うとしている。

1. ひび割れ幅 2mm 以上の連続したひび割れがある。
2. T 型橋脚の梁天部近傍において、幅 1mm 以上の連続したひび割れがある。
3. ひび割れ箇所のコンクリート表面に 2mm 以上の段差がある。
4. 過去にひび割れ注入工による補修を実施している場合、補修前のひび割れ幅が明確でなく、そのひび割れが再度 1mm 以上の幅に開口している。

図 6-2 の対策フローにおいては、「ゲルが確認され、梁部において、RC 橋脚では幅 0.3mm 以上、PC 梁橋脚幅 0.2mm 以上のひび割れの総延長が 100mm を超えるもの」か「ゲルが確認され、採取コアの膨張率（全膨張率）が 0.1%を超えるもの」を ASR 橋脚と判定し、表 6-3 に示す定義に従って外観劣化度に分類する。外観劣化度Ⅳと判定された橋脚は非破壊調査またははつり調査を実施して鉄筋の損傷の有無を確認するとしている。

以上より、コンクリート構造物の維持管理において ASR による劣化が確認され、鉄筋健全度の調査を行うまでの流れをまとめると以下に示すようになる。

- ① ひび割れが確認された構造物の内、網目状・拘束方向のひび割れやゲルの滲出が確認された場合、ASR による劣化を受けていると判断する。
- ② ひび割れ幅が一定の値より大きい場合、鉄筋破断の可能性ありとしてはつり調査により損傷の有無を確認する。

表 6-3 外観劣化度の定義<sup>5)</sup>

外観劣化度	定義
I	最大幅 1mm 未満のひび割れが発生している
II	最大幅 1mm 以上のひび割れが部分的に発生している
III	最大幅 1mm 異常の明瞭なひび割れが梁天端、梁側面に発生し、複数のひび割れが梁両端部まで連続している
IV	最大幅 3mm 以上のひび割れが梁天端に複数発生し、凸形柱の天端や梁端部に顕著なひび割れが発生している

ここで、ひび割れの幅が一定の値より大きい場合に鉄筋の健全度調査を行うという選定方法は、破断の可能性の高い構造物から調査を行うという意味で合理的であると言える。ただし、ひび割れ幅が 0.5mm 以下でも鉄筋破断が確認された橋脚の事例があることを考慮すると<sup>6)</sup>、ひび割れが ASR によるものと確認された時点で、本研究で提案するような非破壊検査方法を活用した鉄筋健全度調査を定期的に行うことが望ましいと考える。

## 6.2.2 鉄筋探査

鉄筋健全度調査を行うには対象構造物の鉄筋の位置やかぶり等の情報を得る必要があり、これらを非破壊で得る試験方法として第 1 章で説明した電磁誘導法の他に電磁波レーダ法などが提案されている。電磁波レーダ法は電磁波が電氣的性状の異なる物質、例えば鉄筋・空洞などの境界面で反射する性質を利用し、コンクリート表面から電磁波を送信し反射波の受信に至るまでの時間からコンクリート内部の配筋等の情報を得る手法である。一般的にコンクリート用の電磁波レーダは減衰特性や実用的なアンテナとの整合性を考慮し、500MHz～25GHz のマイクロ波帯の電磁波を使用しており、埋設物までの距離は式(6.1)で表される<sup>7)</sup>。

$$D = \frac{V \times T}{2} \quad (6.1)$$

ここに、

$$V = \frac{C}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6.2)$$

$D$  : 埋設物までの距離

$V$  : 媒体中の電磁波速度

$T$  : 送信時刻から反射波の受信時刻までの時間差

$C$  : 空気中の電磁波速度 ( $3 \times 10^8 \text{m/s}$ )

$\epsilon_r$  : 媒体中の比誘電率

コンクリートの比誘電率 $\epsilon_r$ は乾燥状態で 4～12、湿潤状態で 8～20 と変化するため、対象構造物の比誘電率の算出を行う必要がある<sup>1)</sup>。

電磁誘導法と電磁波レーダ法の要求性能を表 6-4 に示す<sup>8)</sup>。電磁誘導法はかぶりの測定に加え鉄筋径の測定を行うことができる。一方、電磁波レーダ法は測定可能なかぶりが大きく、またコンクリート中の空洞等の調査も行えるというメリットをもつ。

国土交通省の「非破壊試験によるコンクリート構造物中の配筋状態及びかぶり測定要領」によると、橋梁上部工は電磁誘導法、橋梁下部工は電磁波レーダ法を使用することを標準としている<sup>9)</sup>。ただし、漏洩磁束法の測定結果は鉄筋径により影響を受けるため、設計図などから鉄筋径に関する情報が得られない場合は、橋梁下部工においても電磁誘導法を併用し鉄筋径を推定する必要がある。

また、測定鉄筋のかぶり、鉄筋径等の情報は漏洩磁束法片面診断の過程から得られる可能性も示されており、この手法については付録 2 で説明を加えるものとする。

表 6-4 鉄筋探査手法の要求性能<sup>9)</sup>

		電磁誘導法	電磁波レーダ法
探査対象の鉄筋の種類		D10～D38	D10～D51
鉄筋位置 測定性能	分解能	かぶり50mm未満: 75mm以下のピッチ かぶり50mm以上: かぶり×1.5以下のピッチ	かぶり75mm未満: 75mm以下のピッチ かぶり75mm以上: かぶり以下のピッチ
	測定精度	かぶり50mm未満: ±5mm以内 かぶり50mm以上: かぶりの±10%以内	±5mm以下
かぶり 測定性能	分解能	1mm以下	3mm以下
	測定精度	かぶり40mm未満: ±2mm以内 かぶり40mm以上: ±5%以内	かぶり50～200mm: ±5mm以下 または伝搬時間換算誤差±0.1ns以下
探査性能	探査深度	最少10mm以下, 最大100mm以上	200mm以上
鉄筋径の測定精度		かぶり60mm以下: ±1規格か±4mm以下	

### 6.2.3 漏洩磁束法による鉄筋健全度調査のフロー

ASR による構造物の変状は水分およびアルカリが供給される条件下で長期にわたり進行し、構造物の状態を潜伏期のままでとどめる対策が確立されていないこと<sup>2)</sup>、診断の箇所によっては足場の設置が必要となることを考慮し、ひび割れの幅によらず ASR による劣化が確認された構造物を鉄筋健全度調査の対象とし、数年に 1 回程度実施される定期点検で繰り返し適用することを想定した非破壊試験による鉄筋健全度調査のフローを作成する。

本論文で提案する漏洩磁束法片面診断手法、鉄筋状態のスクリーニング手法および既往の研究<sup>10)</sup>で提案されている漏洩磁束法両面診断手法をあわせた鉄筋健全度調査の非破壊検査手順を図 6-3 に示す。この提案フローの位置づけとしては、図 6-1、図 6-2 で示されている既往の ASR 維持管理フロー中で、「ひび割れ幅による外観劣化度の判定」から「鉄筋健全度調査」に対応するものである。以下、提案フローの各ステップに関する説明を加える。

#### (1) ひび割れ幅の大きさによる鉄筋健全度調査の優先順位

ひび割れの幅が大きいほど鉄筋破断の可能性が大きいと考えられるため、ひび割れの幅の大きさにより定期点検で鉄筋健全度調査を行う頻度などを決定する。点検時期を決定する要素としてはひび割れ幅の他にその構造物の重要度なども考えられる。

## (2) 鉄筋探査

対象構造物の設計図などから配筋に関する情報を得られる場合はその情報も参考に電磁誘導法，電磁波レーダ法等の非破壊検査により鉄筋位置，かぶり，鉄筋径の情報を得る．鉄筋の位置については，初回の鉄筋探査時に外観を損ねない程度にマーキングを行っておくことで次回以降の診断がスムーズになると思われる．

## (3) 環境磁場および鉄筋の残留磁化の確認

スクリーニングの診断指標である 500 磁束密度に影響を与える診断方向の環境磁場の計測を行う．また，着磁前の鉄筋に対し鉄筋直上で磁束密度の測定を数か所行い，強い残留磁化の有無を調べ，スクリーニング手法が適用できるか否かを確認する．

## (4) 簡易な着磁・測定による鉄筋状態のスクリーニング

鉄筋状態についてのスクリーニングを行い，「領域Ⅰ：破断なし」は経過観察，「領域Ⅲ：破断あり」ははつり調査を行い確認する．どちらにも属さない「領域Ⅱ」については漏洩磁束法による片面または両面診断の対象とする．ここで診断指標の 1 つである 500 磁束密度については，測定磁束密度結果から(3)で得た環境磁場を差し引いた磁束密度より得るものとする．

## (5) 片面からの着磁・測定による鉄筋状態の診断

隅角部に対し片面側からのみアクセスできる場合は片面診断を行う．補正ピーク値，最大変化率の 2 つの指標を用いた診断結果が一致した場合，もしくは正しく得られた片方の指標の結果から「破断なし」と「破断あり」を判定する．2 つの指標の診断結果が一致しない場合，両方の指標が正しく得られず鉄筋状態の診断が行えない場合などは「破断の疑い」と安全側に判定することが望ましいと考えた．

## (6) 両面からの着磁・測定による鉄筋状態の診断

隅角部に対し両面側からのアクセスが可能な場合はより精度の高いと考えられる両面診断を行う．両面診断は測定鉄筋の曲げ加工部を 0 $\mu$ T とした補正磁束密度のグラフより得られたピーク値を用いて破断の有無を行う．

## (7) 破断本数・箇所を考慮した補修・補強の可否の検討

診断結果をもとに対象箇所が破断している場合の構造物の耐荷性能を計算し，補修または補強の必要性の検討を行う．

## (8) 診断データの記録

対象鉄筋のかぶり，鉄筋径，診断結果に加えて，どの鉄筋に対しスクリーニング手法の簡易な着磁，片面・両面診断による着磁を行ったか，探査により特定できなかった鉄筋の存在等を記録し，次回以降の診断の際の参考にする．

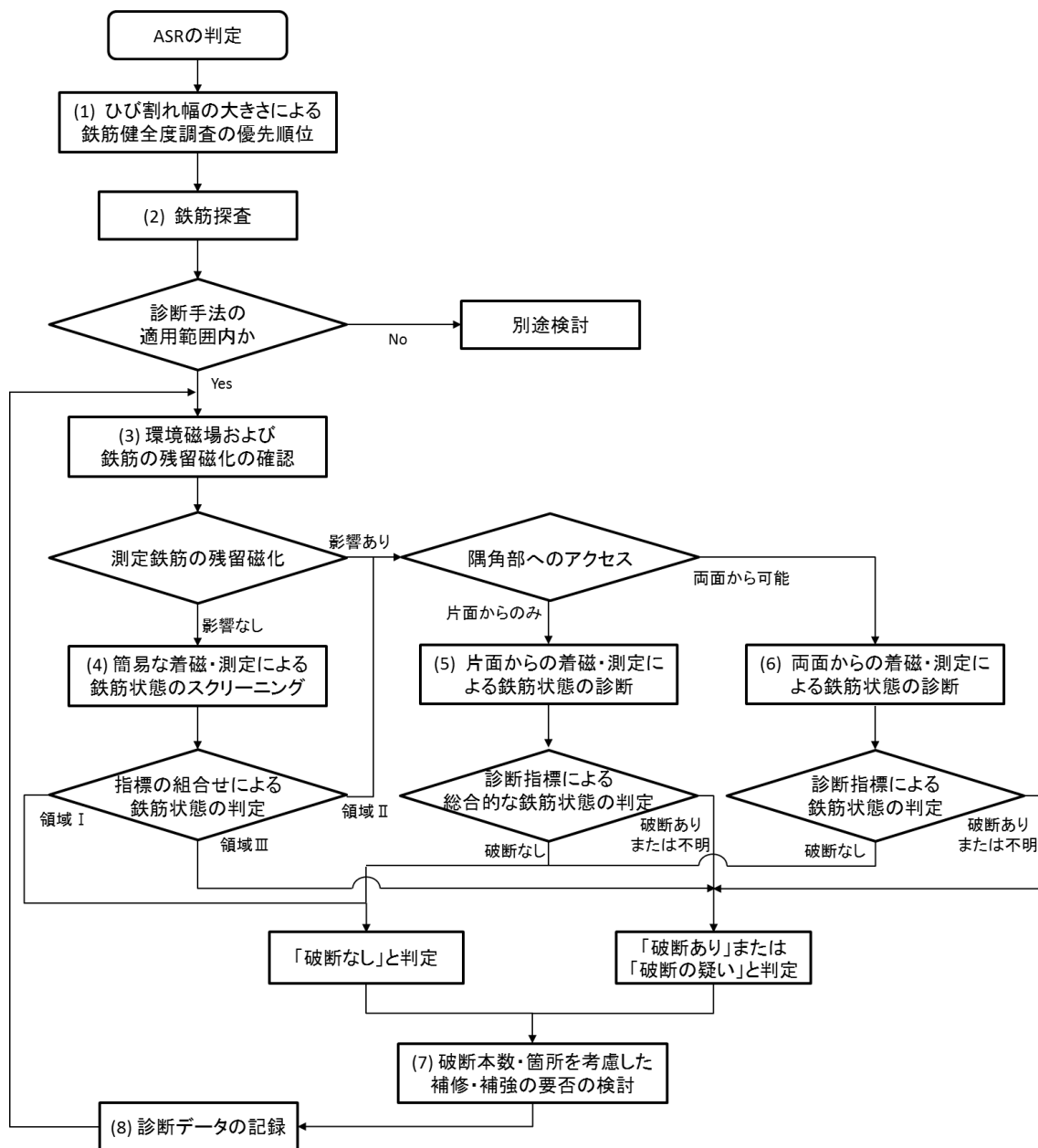


図 6-3 漏洩磁束法による鉄筋健全度調査の提案フロー

#### 【参考文献】

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリート診断技術 '12[基礎編]，pp.122-132, 201-202, 2012.2
- 2) 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書維持管理編，丸善出版，2013.10
- 3) 国土交通省道路局：道路橋のアルカリ骨材反応に対する維持管理要領（案），2003.3  
[http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/arukari\\_youryou.pdf](http://www.cbr.mlit.go.jp/architecture/kensetsugijutsu/download/pdf/arukari_youryou.pdf)



- 4) 阪神高速道路株式会社：ASR 構造物の維持管理マニュアル，電気書院，2007.2
- 5) ASR に関する対策検討委員会：アルカリ骨材反応による劣化を受けた道路橋の橋脚・橋台躯体に関する補修・補強ガイドライン（案），2008.3  
[http://www.kkr.mlit.go.jp/road/iji/pdf/asr\\_guideline.pdf](http://www.kkr.mlit.go.jp/road/iji/pdf/asr_guideline.pdf)
- 6) 鳥居和之，宮村雅之，湊俊彦，西川元気：能登有料道路の基礎構造物の ASR 劣化とその対策，コンクリート工学誌，Vol. 46，No. 4，pp.27-33，2008.4
- 7) 日本非破壊検査協会：新コンクリートの非破壊試験，技報堂出版，pp.55-60，2010.3
- 8) 日本非破壊検査工業会：コンクリート中の配筋探査に使用する装置についての規格，2012.1  
<http://www.jandt.or.jp/training/ninshou/linkfiles/kenki-6502.pdf>
- 9) 国土交通省大臣官房技術調査課：非破壊試験によるコンクリート構造物中の配筋状態及びかぶり測定要領，2012.3  
<http://www.mlit.go.jp/tec/sekisan/sekou/pdf/240328betten2kaburi.pdf>
- 10) 廣瀬誠，前田龍己，松田耕作，横田優，服部篤史，宮川豊章：磁気法による鉄筋破断非破壊検査における判定基準の構築，構造工学論文集，Vol. 58A，pp.867-878，2012.3

## 第 7 章 結論

### 7.1 本研究により得られた結論

本論文では ASR による橋脚梁部のスターラップの破断を想定し、隅角部の片面からしか診断が行えない場合でも適用可能な漏洩磁束法片面診断手法を提案し、非破壊検査による鉄筋健全度調査の手順を示した。以下に本研究により得られた結果を示し結論とする。

第 1 章では、ASR の抑制対策が行われる以前に建造されたコンクリート構造物が大量にストックされていること、またそれらの構造物で内部の鉄筋が破断している事例が報告されていること、これまでに提案されている鉄筋破断を非破壊で効率的に抽出する方法では構造の制約上適用できないケースが存在することを示し、漏洩磁束法の原理を利用した新たな診断手法の提案を行うという本研究での目的を明らかにした。

第 2 章では、漏洩磁束法の原理を利用した片面からの着磁を行うことで、破断の有無によりどのような帯磁状況の違いが生じるかを有限要素法による 3 次元静磁場解析により明らかにし、その違いを表す診断指標の差が大きくなる着磁方法を実験により検討した。その結果、以下に示す知見を得た。

1. 測定鉄筋の直上および 300mm 隣で測定鉄筋長手方向に着磁を行うことで、破断箇所に磁極の影響が集中することにより測定磁束密度のグラフに差が見られる。
2. 得られた測定磁束密度のグラフより、「補正ピーク値」、「最大変化率」という指標をとることで地磁気等の環境磁場、上部工の桁内部の鉄筋等の影響を受けることなく破断の有無の診断が可能である。
3. 磁石ユニットの中心を基準として、着磁は隅角部のできるだけ上方から開始し、隅角部の 300mm 以上下方まで行うことで健全と破断の診断指標の差が安定して得られる。
4. 隅角部から上部工までのスペース、使用する磁石ユニットの寸法を考慮し、本研究の着磁方法を鉄筋曲げ加工部の 10mm 上から開始し 600mm のストロークを行うと定めた。

第 3 章では、診断対象鉄筋の鉄筋状態、かぶり、鉄筋径といった要因が片面診断に与える影響を調べるとともに、診断指標のばらつきの評価を行い破断の有無の判断基準の設定方法について検討した。その結果、以下に示す知見を得た。

1. 鉄筋状態について、曲げ加工部内側からの亀裂が進展するほど診断指標の値は大きくなるが、亀裂状態の診断は難しい。
2. 破断ギャップが大きくなるほど健全との差は大きくなり診断がし易くなるが、ギャップ 0mm の接触状態でも十分診断は可能である。
3. かぶり 50～150mm の範囲において、着磁を行うかぶりの影響はほとんどないが、磁束密度を測定するかぶりは診断指標に影響し、測定かぶりが大きくなるほど診断指標

の値および健全・破断の差は小さくなる。

4. 測定鉄筋の径により診断指標の値は変化するため、鉄筋径ごとの破断の有無の判断基準が必要である。
5. 診断指標の値のばらつきは正規分布、対数正規分布のどちらでも概ね評価できる。
6. 対数正規分布を用いて設定したかぶり 50～150mm までの判断基準により、健全鉄筋と接触鉄筋をそれぞれ「破断なし」、「破断あり」と判定できる。

第 4 章では、現場での配筋状態を想定した要因として配筋ピッチが診断指標に与える影響を調べ、ピッチごとの判断基準を示すとともに、実在する橋梁で行った診断結果よりその妥当性の検討を行った。その結果、以下に示す知見を得た。

1. 鉄筋の配筋ピッチが狭くなるほど診断指標の健全と接触の差が小さくなり、診断が難しくなる。
2. 補正ピーク値についてはピッチ 100～200mm と 200～300mm まで、最大変化率についてはピッチ 200～300mm までの実験結果を統合した破断の有無の判断基準を示した。
3. 実在する橋梁に提案手法を適用した結果、事前の鉄筋探査で特定できなかった配筋等の影響により測定磁束密度のグラフの形状が複雑となり正しい指標の値が得られないケースがあったが、補正ピーク値、最大変化率の 2 つの指標を総合的に判断することにより鉄筋状態を診断することができた。

第 5 章では、より簡易な着磁手法による鉄筋状態のスクリーニング手法を提案し、その診断のメカニズムを解析により明らかにするとともに、診断対象鉄筋の影響要因およびばらつきに関する実験結果から片面診断手法との比較検討を行い、鉄筋状態の判定方法を示した。その結果、以下に示す知見を得た。

1. 磁石ユニットを曲げ加工部に設置し、主鉄筋方向にスライドさせる簡易な着磁方法を行うことで、健全では測定鉄筋が上面側部分から曲げ加工部の範囲が着磁されるのに対し、破断では曲げ加工部のみ磁石の影響を受け、その影響を受けて端部側に反対の磁極が生じることで、測定磁束密度のグラフに差が表れる。
2. 得られた測定磁束密度のグラフより、「500 磁束密度」、「補正ピーク値」という指標をとることで破断の有無の診断が可能であるが、500 磁束密度は地磁気等の環境磁場の影響、補正ピーク値は上部工の桁内部の鉄筋等の影響を受けるため、適用条件の確認が必要である。
3. 亀裂状態の診断は片面診断同様に難しい。
4. 破断ギャップが大きくなるほど健全との差は大きくなり診断がし易くなり、十分な精度で診断が可能と考えられるのは破断ギャップ 2mm 以上の場合である。
5. 診断指標の値は着磁を行うかぶり、測定を行うかぶりどちらにも影響を受ける。
6. 片面診断と同様に、測定鉄筋の径により診断指標の値は変化するため、鉄筋径ごとの

破断の有無の判断基準が必要である。

7. 診断指標のばらつきは正規分布で概ね評価できる。
8. 2つの診断指標を  $x$ - $y$  座標にプロットすることで、かぶり 50～150mm の範囲でかぶりの値に関わらず健全、接触、破断をそれぞれ「領域Ⅰ」、「領域Ⅱ」、「領域Ⅲ」に概ねスクリーニングすることができる。
9. 簡易な着磁による対象鉄筋への着磁範囲は磁束密度の測定範囲に対して狭いため、片面診断で行う測定鉄筋長手方向の着磁を行った後などの強い残留磁化が残っている場合、グラフの形状が変化し診断指標の値を正しく取れないため、着磁前の鉄筋の残留磁化を確認する必要がある。

第6章では、提案した漏洩磁束法片面診断手法、スクリーニング手法および現行の ASR 劣化構造物の維持管理の手順の整理を行い、非破壊検査である漏洩磁束法による鉄筋健全度調査のフローを提案した。以下にその概要を示す。

1. ASR による劣化が確認された構造物をひび割れ幅が大きいものから優先的に鉄筋健全度調査の対象とし、事前調査として電磁波レーダ法、電磁誘導法を用いた非破壊検査による鉄筋探査を行い、対象構造物の設計図から得られる情報と併せて測定鉄筋のかぶり、鉄筋径、鉄筋位置など適用条件を明らかにする。
2. 簡易な着磁により、対象鉄筋を「領域Ⅰ：破断なし」、「領域Ⅱ」、「領域Ⅲ：破断あり」と判定し、鉄筋状態のスクリーニングを行う。
3. 領域Ⅱに分類された対象鉄筋に対し、本研究で提案した片面診断手法または既往の研究より提案されている両面診断手法を適用し、破断の有無の診断を行う。

## 7.2 今後の課題および展望

### (1) 配筋状態ごとの判断基準の作成

本論文では橋脚梁部のスターラップ曲げ加工部での破断を想定し、D16 のスターラップについて鉄筋状態の判定基準の設定を行ってきたが、この判断基準は鉄筋径や配筋状態により変化するため、実際の現場での適用にあたり主鉄筋曲げ下げ部での検討などより多くのケースに対応させる必要がある。

### (2) 漏洩磁束法以外の非破壊検査手法との併用

本論文では漏洩磁束法による鉄筋健全度調査の適用フローの提案を行ったが、鉄筋探査により検知できなかった配筋等の影響により診断指標が実験・解析結果のように得られないケースも見られた。より診断の精度を向上させるためには他の非破壊検査手法も併用した多角的な診断による鉄筋健全度調査のフローが必要だと考える。

### (3) 漏洩磁束法を用いたコンクリート構造物のモニタリング手法の検討

ASR により劣化した構造物は一般的に「事後保全」の維持管理区分となっているため、本論文では健全な鉄筋および破断した鉄筋に対し着磁を行ったが、破断していない鉄筋に

着磁を行った後、破断した場合の残留磁化の影響はわかっていない。破断に至るまでの過程および破断の前後での残留磁化の変化に顕著な差が見られるならば、日常点検ごとの着磁作業を省くことができる可能性があり、また診断指標を得られる箇所が明らかであれば、その位置にセンサ等を設置しモニタリングを行うことで「予防保全」的な対応を行うことができる可能もあると考えられる。

## 謝辞

本論文は、急務となっているコンクリート構造物内部の鉄筋破断の非破壊検査手法の確立という課題に対し、適用範囲を広げる漏洩磁束法片面診断手法およびより簡易なスクリーニング手法について検討し、非破壊試験による鉄筋健全度調査の適用フローの提案を行ったものです。

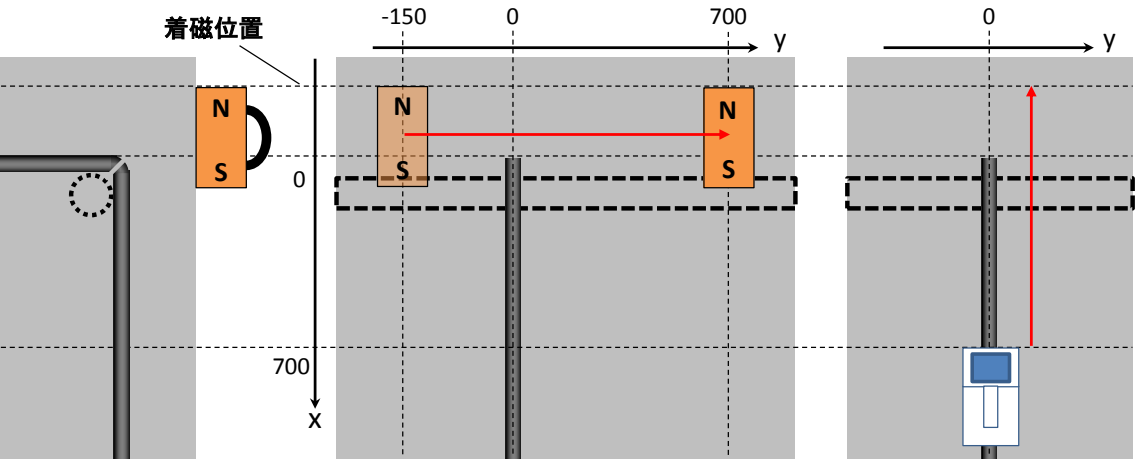
本論文を取りまとめるにあたり、多くの方々のご協力を賜りました。筆者が所属する構造物マネジメント工学講座の河野広隆教授には研究全般にわたり、研究の方向性に関する適切かつ重要なアドバイスを幾つも頂きました。同講座 服部篤史准教授には研究を始めた当初から度々話し合いの場を設けて頂き、至らぬ筆者が度重なるご迷惑をお掛けした時も、常に温かく研究の進捗状況を気にかけて下さいました。同講座 石川敏之助教にはゼミの場、あるいは研究室にて、診断の指標や統計に関するアドバイスを頂きました。社会基盤工学専攻構造工学講座材料分野の宮川豊章教授にはご多忙の中打合せの席に同席頂き、研究に関する貴重なご意見・ご指摘を賜りました。先生方の懇切丁寧なご指導を賜りましたこと、ここに深く感謝の意を表します。

(株)四国総合研究所の廣瀬誠様、横田優様、前田龍己様には研究の計画段階から様々なご相談をさせて頂きました。また、解析結果や現場診断の測定結果等の貴重なデータのご提供など並々ならぬご協力を頂きました。この場を借りて厚く御礼申し上げます。

実験室をご提供下さった環境材料学講座の金子佳生教授、同講座 佐藤裕一助教、建築構法学講座の西山峰広教授、器具のメンテナンスや実験台材料のご相談をさせて頂いた技術職員の平野裕一様、ともに漏洩磁束法に関する研究を進めてきた鈴木辰彦氏、井上丈揮氏、永瀬繁幸氏に対し、心より感謝の意を表します。

# 付録 1：簡易な着磁の着磁位置の検討

簡易な着磁方法において磁石をスライドさせる位置の違いによる診断指標への影響の検討を行った。付図 1-1 に着磁および測定の概要を示す。主鉄筋は配置せず、D16 のスターラップをかぶり 75mm の位置に配置した。磁石ユニットの N 面を基準面として着磁位置を  $x = -300 \sim 100\text{mm}$  まで 50mm 間隔で変化させた。実験要因一覧を付表 1-1 に示す。着磁終了後、磁気計測ユニットを用いてスターラップ直上で  $x = -150 \sim 700\text{mm}$  の範囲の磁束密度を計測した。鉄筋状態は健全および破断（ギャップ：2mm）とし、実験数は各要因につき 2 回ずつ行った。

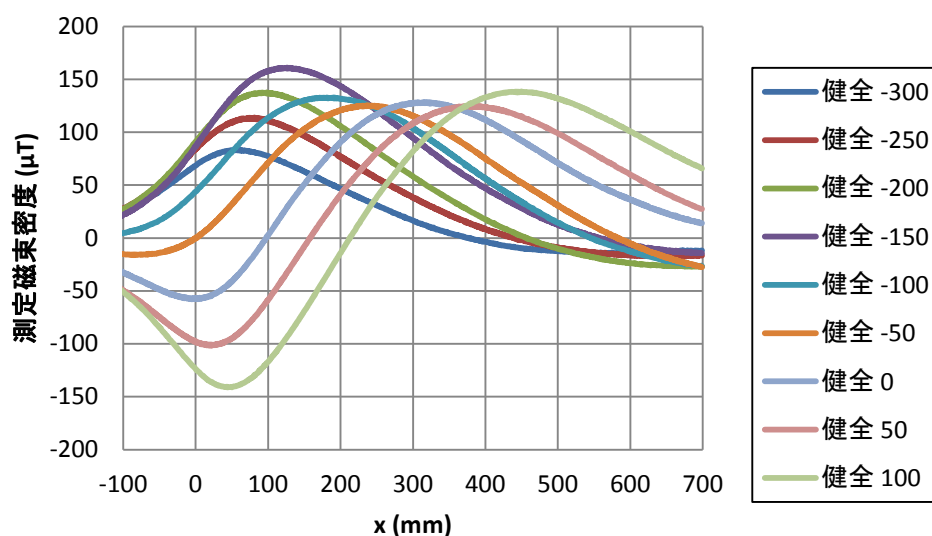


付図 1-1 着磁および測定方法

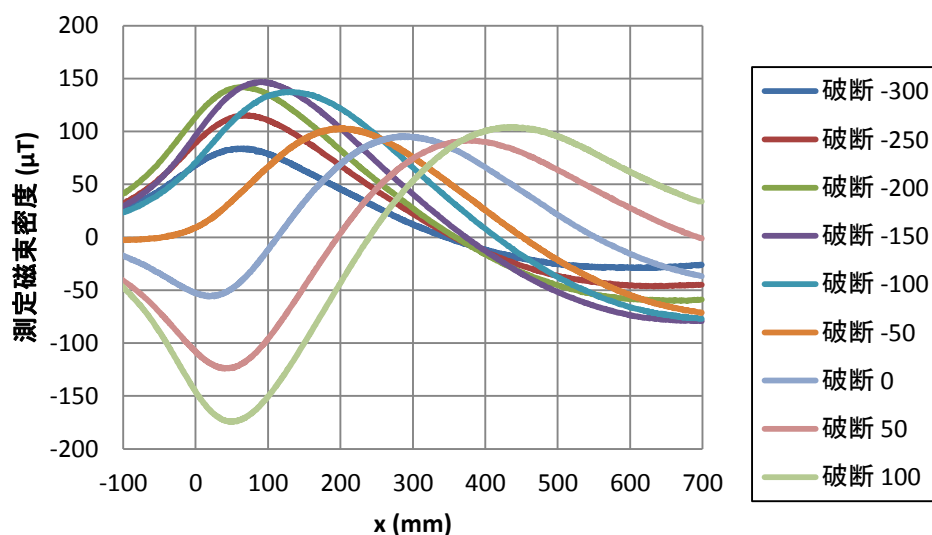
付表 1-1 着磁位置に関する実験要因一覧

かぶり(mm)	着磁位置	鉄筋状態	実験数
75	$x = -300 \sim 100\text{mm}$ 50mm 間隔	健全 破断（ギャップ：2mm）	各 2 回

付図 1-2 に磁束密度の測定結果を示す。測定磁束密度のグラフは着磁位置ごとに 2 回ずつ行った測定結果を平均したものである。付図 1-2 より、着磁位置が  $x > 0$  の場合、隅角部付近においてグラフの形状が下に凸、つまり S 極の影響が表れている。この着磁方法では曲げ加工部直上を通過する磁石ユニット S 極の影響により隅角部（ $x = 0$ ）付近に N 極を付与し、破断の場合には隅角部から離れた位置（ $x > 0$ ）が S 極に帯磁され、その影響を捉えることが目的であるため、第 5 章で選定した診断指標である 500 磁束密度および補正ピーク値を得るためには、磁石をスライドさせる位置が隅角部の上方（ $x < 0$ ）であることが条件である。



(a) 健全

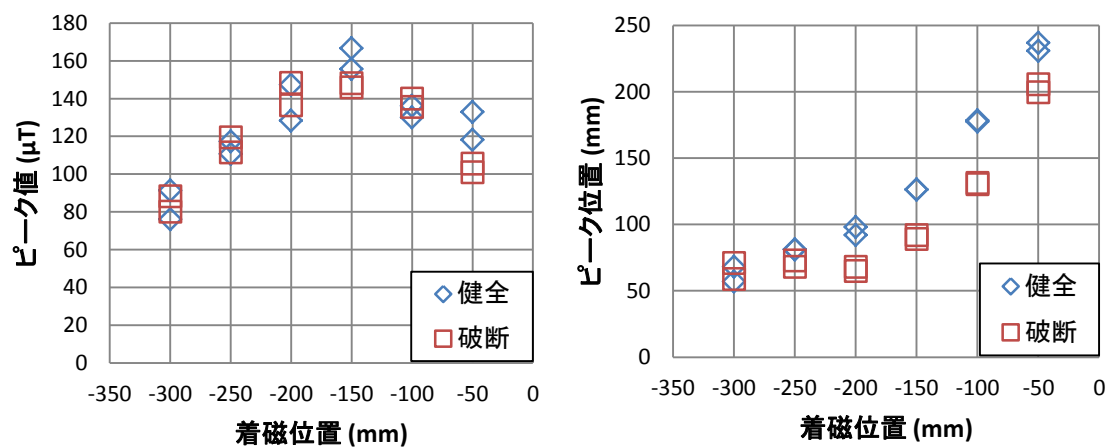


(b) 破断

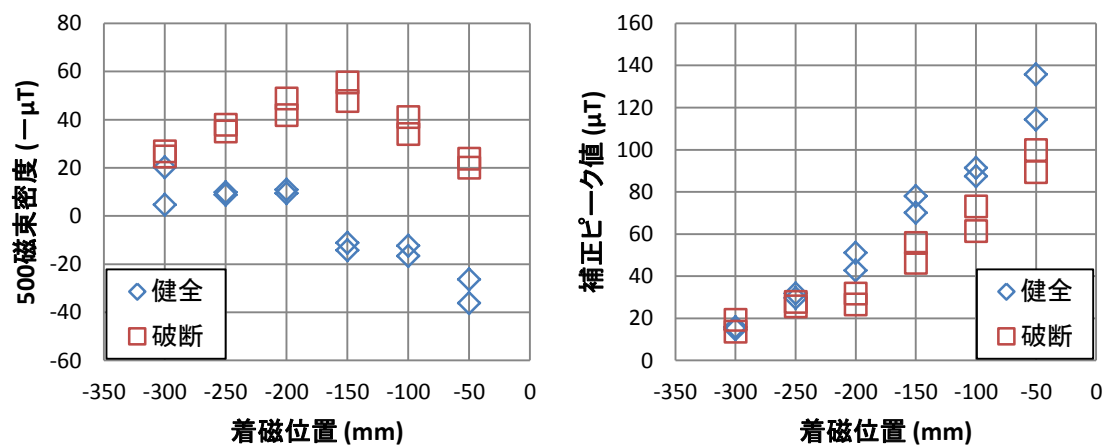
付図 1-2 着磁位置ごとの磁束密度測定結果 (かぶり : 50mm)

着磁位置とピーク値・ピーク位置との関係を付図 1-3 に、500 磁束密度・補正ピーク値との関係を付図 1-4 に示す。隅角部付近の上に凸のピークの値は着磁位置が  $x = -150$  の場合に最も大きくなっており、着磁位置が大きくなるほどそのピークの位置も大きくなっていく。500 磁束密度では、着磁位置  $x = -50 \sim -100$  の範囲で健全と破断の指標の差が大きくなっている。補正ピーク値はピーク位置と同様、着磁位置が大きくなるに従い一様に大きくなっており、着磁位置が  $x > -200$  で健全が破断より指標の値が大きくなっている。

以上より、隅角部から 150mm ほど上方で磁石をスライドさせることにより、簡易な着磁による診断指標の差が安定して得られることがわかった。



付図 1-3 ピーク値・ピーク位置と着磁位置の関係

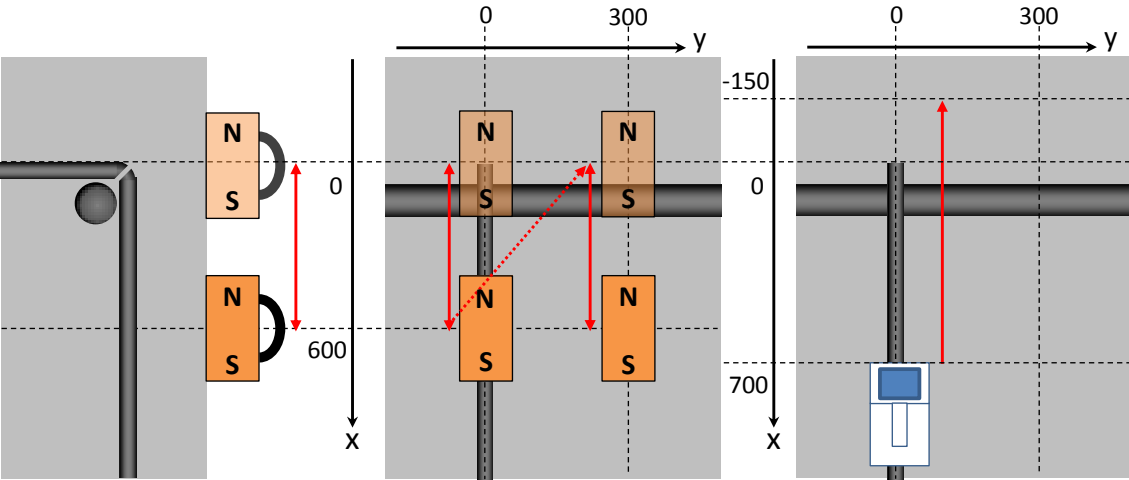


付図 1-4 500 磁束密度・補正ピーク値と着磁位置の関係



## 付録 2：漏洩磁束法片面診断によるかぶりの推定

漏洩磁束法片面診断の測定結果からかぶりを推定する指標の検討を行う。付図 2-1 に着磁および測定の概要を、付表 2-1 に実験要因一覧を示す。D32 の主鉄筋とスターラップを 1 本ずつ配置し、かぶりを 50～100mm まで 5mm 間隔でとった。着磁範囲は磁石ユニットの中心を基準面として  $x = 0 \sim 600\text{mm}$  である。着磁終了後、磁気計測ユニットを用いてスターラップ直上で  $x = -150 \sim 700\text{mm}$  の範囲の磁束密度を計測した。鉄筋状態は健全および接触（ギャップ：0mm）とし、実験数は各要因につき 5 回ずつ行った。

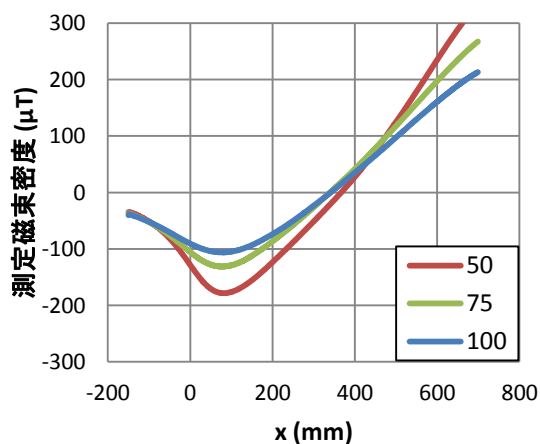


付図 2-1 着磁および測定方法

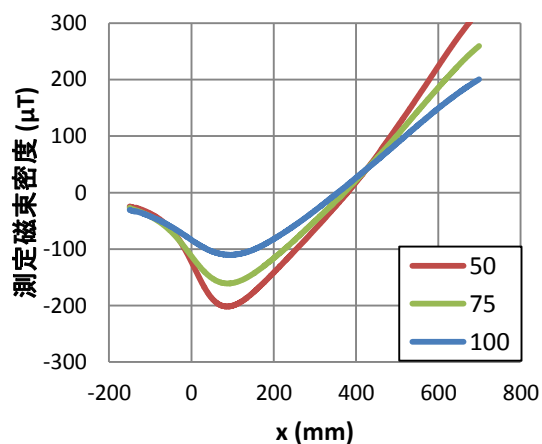
付表 2-1 実験要因一覧

鉄筋径	かぶり	鉄筋状態	実験数
D16	50～100mm まで 5mm 間隔	健全 接触(ギャップ:0mm)	各 5 回
D13	75mm		
D22			

付図 2-2 は実験から得られた測定磁束密度結果の一例を示したものである。本論文で見てきたように、健全よりも接触の方がピークの山が高く急峻になっている。また、健全・破断ともにかぶりが大きくなるほど測定磁束密度グラフの形状が平らになるという特徴を持つ。付図 2-3 は一定区間を 30mm とした区間平均変化率をとったものである。付図 2-3 からも健全と接触で隅角部（ $x = 0$ ）付近の最大変化率に明らかな違いがあることがわかる。

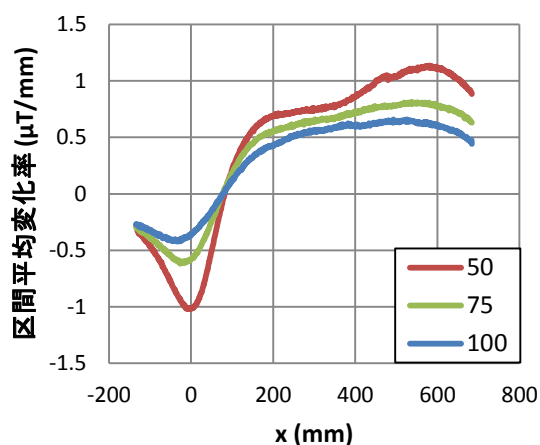


(a) 健全

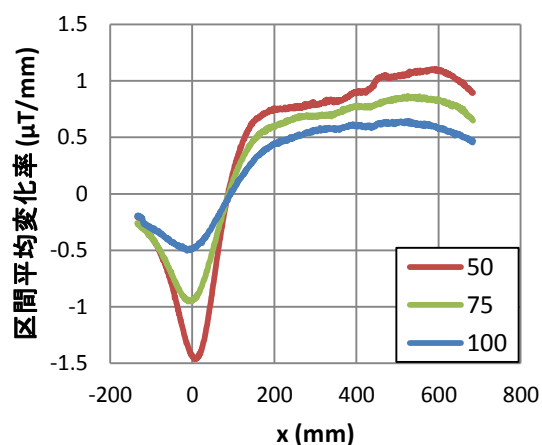


(b) 接触

付図 2-2 かぶりごとの測定磁束密度



(a) 健全

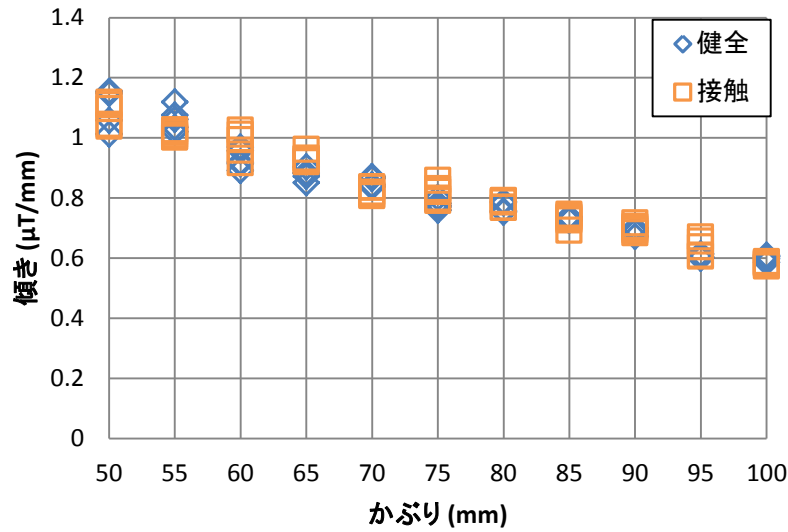


(b) 接触

付図 2-3 かぶりごとの区間平均変化率

一方、隅角部から離れた位置 ( $x > 200\text{mm}$ ) では区間平均変化率のグラフは健全・接触で同様の値となっていることがわかる。また、その値はかぶりが小さいほど大きくなっていることから、隅角部から十分離れた位置の測定磁束密度グラフの形状を評価することで、破断の有無に依らず、かぶり等の測定鉄筋に関する情報を得られる可能性があると考えた。ここでは着磁終了位置の  $x = 600\text{mm}$  に着目し、着磁終了位置  $\pm 50\text{mm}$  での傾きを指標とし、測定鉄筋のかぶり、鉄筋径との関係を検討する。

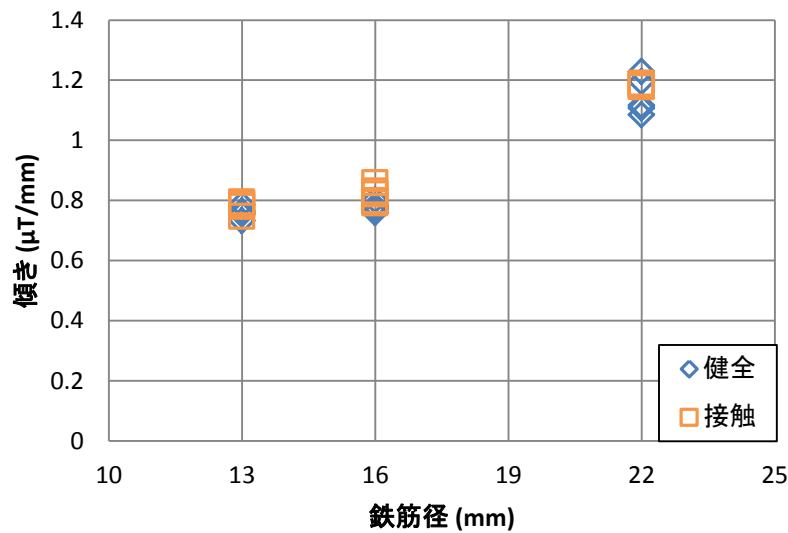
付図 2-4 にかぶりと着磁終了位置での傾きの関係を示す。鉄筋径は D16 である。かぶりが大きくなるほどこの傾きは小さくなり、またいずれのかぶりにおいても、健全と接触で値に差がほとんどないことがわかる。



付図 4 かぶりと着磁終了位置の傾きの関係

付図 2-5 はかぶり 75mm での着磁終了位置の傾きと鉄筋径の関係を示した図である。鉄筋径が大きくなるに従って着磁終了位置での傾きは大きくなっており、本論文第 3 章で示した結果とも一致する。また、どの鉄筋径においても健全と接触で傾きの値がほぼ同じであることが確認できる。

以上より、着磁終了位置での傾きは鉄筋の破断の有無に依らず、鉄筋のかぶり、鉄筋径の影響をうける指標であると考えられる。ここで、付図 2-4 の結果から各かぶりにおいて健全と破断の 5 個ずつ計 10 個の傾きを平均した値を用いてかぶりの推定を試みる。



付図 5 鉄筋径と着磁終了位置の傾きの関係

D16 鉄筋の 50～100mm の範囲でのかぶりと着磁終了位置での傾きの関係は、指数関数を用いて近似すると以下に示す関係となった。

$$y = 230188e^{-1.3932x}$$

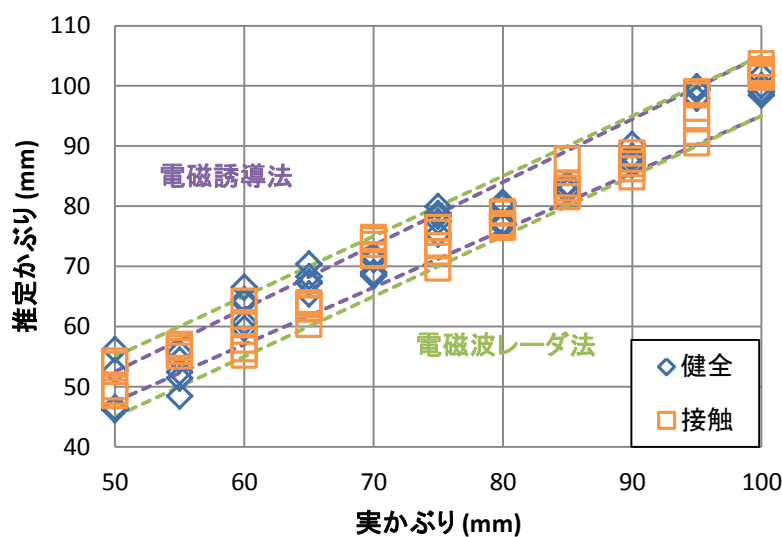
ここに、

$x$  : 着磁終了位置での傾き ( $\mu\text{T}/\text{mm}$ )

$y$  : 推定かぶり (mm)

この推定式に付図 2-4 の着磁終了位置での傾きを代入して得られる推定かぶりと実際のかぶりの関係を付図 2-6 に示す。ここで本論文第 6 章の表 6-4 に示した電磁誘導法と電磁波レーダ法によるかぶりの測定精度と比較すると、ほぼ同精度の推定が可能という結果となった。

本手法はあくまで漏洩磁束法片面診断の過程で得られた磁束密度分布からかぶりなどの情報を引き出すものであり、かぶりの推定そのものを目的とした診断には手間がかかるため不向きであるが、電磁誘導法・電磁波レーダ法といった鉄筋探査方法から得られる情報と併せて鉄筋破断診断の精度向上を図ることができると考えられる。ただし、本手法はピッチによる影響など未検討の要因が数多くあり、指標の取り方についても更なる検討を加える必要がある。



付図 6 かぶり推定式の適用性